



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Efectos de la restauración de los bosques montanos tropicales sobre el funcionamiento ecohidrológico de cuencas hidrográficas

Marcela Mosquera Vásquez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales
Medellín, Colombia
2024

Efectos de la restauración de los bosques montanos tropicales sobre el funcionamiento ecohidrológico de cuencas hidrográficas

Marcela Mosquera Vásquez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Bosques y Conservación Ambiental

Director:

Ph.D. Conrado Tobón Marín

Grupo de Investigación:

Hidrología y Modelación de Ecosistemas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales

Medellín, Colombia

2024

***A Jenny, mi madre y ejemplo de
tenacidad.***

*Por tener la fortuna de ser tu hija y poder
contar con tu apoyo incondicional en estos años de
investigación, luchas, sinsabores y triunfos.*

Agradecimientos

Primero agradecerle a Dios por las bendiciones recibidas, luego a mi mamá Jenny Vásquez por todo su apoyo y aliento en los momentos difíciles de esta etapa de mi vida, por sus consejos y más que todo por el ejemplo impartido durante mi vida.

A la Fundación Natura - Colombia, quienes proporcionaron el espacio de la Reserva Biológica El Silencio para desarrollar esta investigación y Carlos Sepúlveda que fue la persona que me acompañó en los recorridos por la reserva y me apoyó en las labores de campo.

A la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE), que mediante el convenio 475-2017 apoyaron a este proyecto y con ello se pudo desarrollar y alcanzar los resultados aquí presentados.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en especial a los laboratorios de la Facultad de Ciencias Agrarias, por su apoyo en este proceso y permitir la ejecución de algunos análisis en sus áreas.

A los profesores: Conrado Tobón por ser mi tutor, apoyarme, guiarme y aclarar mis inquietudes a lo largo de la maestría, gracias a sus conocimientos y amplia experiencia; a María Teresa Flores por su paciencia y valiosa colaboración; y a Guillermo Correa por su asesoría.

Al “Negro” por ser un apoyo incondicional en la etapa decisiva de este proceso, por su gran ayuda, su dedicación y sus palabras de motivación.

Finalmente, A todos mis compañeros de la maestría por el apoyo mutuo y a todas y cada una de las personas que creyeron en mí y me colaboraron desinteresadamente.

Resumen

Efectos de la restauración de los bosques montanos tropicales sobre el funcionamiento ecohidrológico de cuencas hidrográficas

La restauración ecológica cada vez tiene mayor importancia a nivel mundial, debido a la urgente necesidad de restablecer la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de aquellos ecosistemas que han sido degradados por la sobreexplotación de sus recursos. El objetivo de este estudio fue evaluar los procesos ecohidrológicos en cuencas hidrográficas de Bosque Húmedo Montano Bajo sometidas a restauración ecológica (El Silencio y Montañita), frente a aquellas bajo pasturas (Pastos) y caracterizar las variables que determinan dichos procesos en los ecosistemas emergentes. Las cuencas se instrumentaron y monitorearon durante 14 meses. En cada una se midió la precipitación, el contenido de humedad del suelo (CHS) y los caudales de salida; y se determinó los parámetros físicos del suelo (densidad aparente y porosidad total) e hidráulicos del suelo (infiltración, conductividad hidráulica saturada (K_s) y la capacidad de retención de humedad, pF) e hidrológicos (evapotranspiración real, rendimiento hídrico [RH], coeficiente de escorrentía anual [CEA], curva de duración de caudales, índice de retención y regulación hídrica [IRH], índice de flujo base [IFB], y Richard – Baker Flashiness Index [BF]). El proceso de restauración ecológica en El Silencio y Montañita, en sus primeras etapas, ha permitido una ligera recuperación de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo. La cuenca de Pastos presentó la mayor D_a ($0,84 \text{ g cm}^{-3}$), así como el RH (0,63 %) y CEA (8,30 %). Montañita se destacó en porosidad, Infiltración y K_s con 78,55 %, 19,20 (cm h^{-1}) y 7,22 (cm h^{-1}) respectivamente; pero también mostró el mayor IRH de 0,93; IFB de 92,03 % y el menor IBF de 0,10; asociados a la mayor tasa de evapotranspiración real anual con 1417,71 (mm y^{-1}). Finalmente, el proceso de restauración ecológica en las cuencas El Silencio y Montañita en relación con la cuenca Pastos provocó el aumento de la evapotranspiración y la disminución del rendimiento hídrico, así como tendencia a incrementar la K_s , infiltración y el contenido de humedad del suelo. Sin embargo, el tiempo de la restauración es un factor que determina el comportamiento de los procesos ecohidrológicos y el estado de las propiedades hidrofísicas del suelo que controlan dichos procesos.

Palabras clave: Ecohidrología de restauración, Rendimiento hídrico, Regulación hídrica, Bosques húmedos montanos bajos, Colombia.

Abstract

Effects of tropical montane forest restoration on the ecohydrological functioning of watersheds

Ecological restoration is becoming increasingly important worldwide, due to the urgent need to restore biodiversity and ecosystem services in ecosystems that have been degraded by overexploitation of their resources. The objective of this study was to evaluate the ecohydrological processes in Low Montane Rainforest watersheds under ecological restoration (El Silencio and Montañita), compared to those under pasture (Pasture) and to characterize the variables that determine these processes in the emerging ecosystems. The basins were instrumented and monitored for 14 months. Precipitation, soil moisture content and outflows were measured in each one; and soil physical (bulk density and total porosity), hydraulic (infiltration, saturated hydraulic conductivity (Ks) and moisture holding capacity, pF) and hydrological (actual evapotranspiration, water yield [RH], annual runoff coefficient [AER], flow duration curve, water retention and regulation index [HRI], baseflow index [BFI], and Richard - Baker Flashiness Index [BF]) parameters were determined. The ecological restoration process in El Silencio and Montañita, in its first stages, has allowed a slight recovery of the physical and hydraulic properties of the soil. The Pastos watershed presented the highest Da ($0,99 \text{ g cm}^{-3}$), as well as RH (0,63 %) and CEA (8,30 %). Montañita stood out in porosity, infiltration and Ks with 78,56 %, 19,20 (cm h^{-1}) and 7.22 (cm h^{-1}) respectively; but also showed the highest IRH of 0,93; IFB of 92,03 % and the lowest IBF of 0,10; associated with the highest annual real evapotranspiration rate with 1417,71 (mm y^{-1}). Finally, the ecological restoration process in the El Silencio and Montañita watersheds in relation to the Pastos watershed caused an increase in evapotranspiration and a decrease in water yield, as well as a tendency to increase Ks, infiltration and soil moisture content. However, the time of restoration is a factor that determines the behavior of ecohydrological processes and the state of the hydrophysical properties of the soil that control these processes.

Keywords: Restoration ecohydrology, Water yield, Water regulation, Low montane rainforests, Colombia.

Contenido.

	Pág.
Introducción.....	1
1 Objetivos	5
1.1 Objetivo General	5
1.2 Objetivos Específicos	5
2 Marco Teórico	6
2.1 La Restauración Ecológica.....	6
2.2 Funcionamiento ecohidrológico en cuencas hidrográficas.....	7
2.3 La infiltración y su relación con las propiedades del suelo.....	9
2.4 Impactos de la restauración ecológica en las propiedades del suelo.....	11
3 Métodos	13
3.1 Localización y caracterización de las zonas de estudio	13
3.1.1 Cuenca El Silencio.....	15
3.1.2 Cuenca Montañita.....	15
3.1.3 Cuenca Pastos.	18
3.2 Morfometría de las cuencas hidrográficas.	20
3.2.1 Cálculo de parámetros morfométricos de la cuenca	20
3.2.1.1 Área y perímetro (A, P)	20
3.2.1.2 Longitud de la cuenca (L).....	20
3.2.1.3 Longitud de cauce principal (Lc).....	21
3.2.1.4 Factor de forma (K_f).	21
3.2.1.5 Índice de compacidad o índice de Gravelius (K_c).....	21
3.2.1.6 Pendiente (%).	21
3.2.1.7 Altitud Máxima, Mínimo y Media (m.s.n.m).....	21
3.2.1.8 Curva hipsométrica.	22
3.2.1.9 Densidad de drenaje.	22
3.3 Clima.....	22
3.4 Coberturas - Vegetación.....	24
3.4.1 Cuenca El Silencio.....	24
3.4.2 Cuenca Montañita.....	26
3.4.3 Cuenca Pastos.	28
3.5 Propiedades físicas del suelo.	30
3.5.1 Textura.	30
3.5.2 Densidad aparente (D_a).....	30
3.5.3 Porosidad total (α).	31
3.6 Propiedades hidráulicas del suelo.	31
3.6.1 Infiltración.	32

3.6.2	Conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s).....	32
3.6.3	Capacidad de retención de humedad.....	33
3.7	Materia orgánica.....	33
3.8	Mediciones ecohidrológicas.....	34
3.8.1	Humedad del suelo.....	34
3.8.2	Evapotranspiración.....	35
3.8.3	Caudal.....	36
3.8.3.1	Separación del caudal base (Q_b) y el caudal rápido (Q_r).....	37
3.8.3.2	Curva de duración de caudales y regulación hídrica.....	38
3.8.3.3	Índice de flujo base (IFB).....	40
3.8.3.4	Índice de estabilidad de caudales Richard Baker Flashiness Index (IBF).....	40
3.8.3.5	Respuesta del caudal ante eventos de precipitación.....	41
3.8.4	Rendimiento Hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE).....	41
3.8.4.1	Rendimiento Hídrico.....	41
3.8.4.2	Coeficiente de escorrentía anual (CE).....	42
3.8.5	Balance hídrico.....	42
3.9	Análisis estadístico.....	43
4	Resultados.....	45
4.1	Morfometría de las cuencas hidrográficas.....	45
4.2	Clima.....	48
4.3	Propiedades físicas del suelo.....	56
4.3.1	Caracterización del perfil del suelo.....	56
4.3.2	Textura.....	58
4.3.3	Densidad aparente (D_a).....	58
4.3.4	Porosidad (α).....	60
4.4	Propiedades hidráulicas del suelo.....	62
4.4.1	Infiltración.....	62
4.4.2	Conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s).....	63
4.4.3	Capacidad de retención de humedad.....	65
4.5	Materia orgánica.....	66
4.6	Resultado de las mediciones ecohidrológicas.....	68
4.6.1	Humedad del suelo.....	68
4.6.1.1	Cuenca El Silencio.....	68
4.6.1.2	Cuenca Montañita.....	70
4.6.1.3	Cuenca Pastos.....	71
4.6.2	Evapotranspiración.....	73
4.6.2.1	Caudal total (Q_t), Caudal base (Q_b) y Caudal rápido (Q_r).....	74
4.6.2.2	Cuenca El Silencio.....	74
4.6.2.3	Cuenca Montañita.....	75
4.6.2.4	Cuenca Pastos.....	77
4.6.3	Curva de duración de caudales y regulación-retención.....	78
4.6.3.1	Curva de duración de caudales.....	78
4.6.3.2	Índice de retención y regulación hídrica (IRH).....	79
4.6.4	Índice de flujo base (IFB).....	80
4.6.5	Índice de estabilidad de caudales Richard Baker (IBF).....	80
4.6.6	Respuesta de las cuencas a los eventos de precipitación.....	80
4.6.7	Rendimiento Hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE).....	83

4.6.8	Balance hídrico.....	83
4.7	Análisis de Componentes Principales (ACP).....	86
5	Discusión.....	87
5.1	Morfometría de las cuencas hidrográficas.....	87
5.2	Propiedades físicas del suelo.....	88
5.2.1	Densidad aparente (Da).....	88
5.2.2	Porosidad (α).....	90
5.3	Propiedades hidráulicas del suelo.....	91
5.3.1	Infiltración.....	91
5.3.2	Conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s).....	92
5.3.3	Capacidad de retención de humedad.....	94
5.4	Materia orgánica.....	95
5.5	Mediciones ecohidrológicas.....	97
5.5.1	Humedad del suelo.....	97
5.5.2	Curva de duración de caudales y regulación-retención.....	98
5.5.2.1	Curva de duración de caudales, CDC.....	98
5.5.2.2	Índice de retención y regulación hídrica (IRH).....	99
5.5.3	Índice de flujo base (IFB).....	100
5.5.4	Índice de estabilidad de caudales Richard Baker Flashiness Index (IBF).....	101
5.5.5	Respuesta del caudal ante eventos de precipitación.....	102
5.5.6	Rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía anual (CEA).....	102
5.5.7	Balance Hídrico.....	103
5.5.8	Factores que condicionan los procesos ecohidrológicos.....	104
6	Conclusión.....	106
7	Recomendaciones.....	107
8	Bibliografía.....	109

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 3.1: El estado de la microcuenca de la quebrada La Miel (cuenca El Silencio) en el año 2012 (a) y el proceso de restauración para el año 2018 (b).	15
Figura 3.2: Imagen satelital de la cuenca Montañita en el año 2007 (izquierda) y 2020 (derecha).	16
Figura 3.3: Mapa cuencas hidrográficas Montañita (lado izquierdo) y El Silencio (lado derecho).	17
Figura 3.4: Estado de la Cuenca de Pastos. Uso actual (2019) en ganadería intensiva (a). Vista panorámica de la cuenca (b).	18
Figura 3.5: Ubicación de la cuenca hidrográfica con uso en pastos.	19
Figura 3.6: Estación meteorológica automática marca Davis - Cuenca Pastos (a) y marca Campbell – Cuenca El Silencio (b).	23
Figura 3.7: Pluviógrafos instalados en la cuenca El Silencio (a) y cuenca con Pastos (b).	24
Figura 3.8: Mapa de cobertura de la cuenca El Silencio.	25
Figura 3.9: Mapa de coberturas de la cuenca Montañita.	27
Figura 3.10: Mapa de coberturas de la cuenca Pastos.	29
Figura 3.11: Toma de muestras de suelo para determinación de Densidad aparente (Da) y Contenido de humedad gravimétrica (CRH).	30
Figura 3.12: Distribución espacial de los sensores de humedad del suelo (TDR, Campbell) (a) y estación de monitoreo de la humedad del suelo (b).	35
Figura 3.13: Vertedero abierto tipo canal mejorado, instalados en los puntos de cierre de las cuencas El Silencio, Montañita y pastos.	37
Figura 4.1: curvas hipsométricas de las cuencas hidrográficas objeto de estudio.	47
Figura 4.2: Climograma promedio anual en días en la Cuenca El Silencio.	48
Figura 4.3: Climograma promedio anual en días en la Cuenca Montañita.	49
Figura 4.4: Climograma promedio anual en días en la Cuenca Pastos.	50
Figura 4.5: Radiación solar en la cuenca El Silencio, valores promedios mensuales.	51
Figura 4.6: Radiación solar en la cuenca Montañita, valores promedios mensuales.	51
Figura 4.7: Radiación solar en la cuenca Pastos, valores promedios mensuales.	52
Figura 4.8: Valores promedios mensuales de humedad relativa en las cuencas hidrográficas monitoreadas.	53
Figura 4.9: Rosa de los vientos en la cuenca El Silencio.	54
Figura 4.10: Rosa de los vientos en la cuenca Montañita.	54
Figura 4.11: Rosa de los vientos en la cuenca Pastos.	55

Figura 4.12: Diagrama de barras y bigotes para Densidad Aparente (D_a) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas).....	59
Figura 4.13: Diagrama de barras y bigotes para porosidad (%) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas)...	61
Figura 4.14: Curvas de infiltración ajustadas por regresión lineal al modelo de potencia ($Y=aX^{-b}$) para las cuencas hidrográficas monitoreadas.....	63
Figura 4.15: Diagrama de barras y bigotes para conductividad hidráulica (K_s) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas).....	64
Figura 4.16: Curvas características de retención de humedad de los suelos en las cuencas de estudio.	66
Figura 4.17: Diagrama de barras y bigotes para materia orgánica (%) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas)	67
Figura 4.18: Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en el sitio 1 de la cuenca El Silencio para el periodo de estudio (01/07/2017 – 31/08/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 18 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 27 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 48 cm.	69
Figura 4.19: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 2 de la cuenca El Silencio para el periodo de estudio (01/07/2017 – 31/08/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 9 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 14 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 34 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 52 cm.	69
Figura 4.20: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 1 de la cuenca Montañita para el periodo de estudio (7/1/2017 – 9/3/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 15 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 35 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 65 cm.	71
Figura 4.21: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 2 de la cuenca Montañita para el periodo de estudio (7/1/2017 – 8/30/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 6 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 18 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 30 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 56 cm.	71
Figura 4.22: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 1 de la cuenca Pastos para el periodo de estudio (7/1/2017 – 8/31/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 22 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 43 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 78 cm.	72
Figura 4.23: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 2 de la cuenca Pastos para el periodo de estudio (7/1/2017 – 8/23/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 22 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 50 cm.	73
Figura 4.24: Curva de probabilidad de excedencia de caudales para las tres cuencas hidrográficas estudiadas.....	79
Figura 4.25: Eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de estudio para: SIL= El Silencio, MON= Montañita y PAS = Pastos. Los	

números en el recuadro señalan la precipitación total registrada (P en mm), la duración en horas (D) y la intensidad (I en mm h^{-1}) para cada uno de los eventos seleccionados. 82

Figura 4.26: Escala mensual de las diferentes variables del balance hídrico para las cuencas de estudio (Jul/2017 – Ago/2018). P = precipitación, Qt = Caudal total desde cada una de las cuencas estudiadas, ETa = evapotranspiración real y CHS = cambios en la humedad del suelo. 85

Figura 4.27: Análisis de Componentes Principales (PCA). 86

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 3.1: Ubicación y generalidades del sitio de estudio.	14
Tabla 3.2: Clasificación de los rangos de valores del IRH.....	39
Tabla 4.1: Valores de los parámetros morfométricos de las cuencas en estudio	46
Tabla 4.2: Caracterización de los perfiles de los suelos de las zonas de estudio <i>in situ</i> . 57	57
Tabla 4.3: Media para la Textura en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados (n = 48).....	58
Tabla 4.4: Media para la densidad aparente (g cm^{-3}) en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados (n = 48)	59
Tabla 4.5: Media para la porosidad (%) en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados (n = 48)	60
Tabla 4.6: Media, rango, desviación estándar y coeficiente de variación para la infiltración (n = 36).....	62
Tabla 4.7: Media para la conductividad hidráulica (cm h^{-1}) en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados (n = 48).....	64
Tabla 4.8: Valores promedios de la capacidad de retención de humedad del suelo (Contenido volumétrico) para cada sitio de estudio.	65
Tabla 4.9: Valores promedios de materia orgánica.	67
Tabla 4.10: Valores promedios anuales de las variables de entrada en el modelo de evapotranspiración de Penman-Monteith (ETo), a partir de las cuales se determinó ETa, con datos cada 30 minutos.....	73
Tabla 4.11: Valores promedio anual de la precipitación (P), caudal total (Qt), Caudal base (Qb) y Caudal de tormenta o rápido (Qr) de las cuencas hidrográficas monitoreadas.	74

Tabla 4.12: Valores promedios y desviación estándar, máximos, mínimos y coeficiente de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de bajas precipitaciones en la cuenca El Silencio (n=11).....	75
Tabla 4.13: Valores promedios y desviación estándar, máximos, mínimos y coeficiente de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de altas precipitaciones en la cuenca El Silencio (n=10).....	75
Tabla 4.14: Valores promedios y su desviación estándar, máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de bajas precipitaciones en la cuenca Montañita (n=10)....	76
Tabla 4.15: Promedios y su desviación estándar, valores máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de altas precipitaciones en la cuenca Montañita (n=10).....	76
Tabla 4.16: Valores promedios y desviación estándar, máximo, mínimo y coeficiente de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de bajas precipitaciones en la cuenca Pastos (n=12)	77
Tabla 4.17: Promedios y su desviación estándar, valores máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de altas precipitaciones en la cuenca Pastos (n=12)	77
Tabla 4.18: índice de retención y regulación hídrica (IRH).....	79
Tabla 4.19: índice de flujo base anual (IFB).....	80
Tabla 4.20: índice de estabilidad de caudales anual (IBF).....	80
Tabla 4.21: Promedios, desviación estándar, valores máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de estudio (n=9).....	81
Tabla 4.22: Rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE) determinados para las cuencas monitoreadas durante el periodo de medición.	83
Tabla 4.23: Balance hídrico anual para las cuencas de El Silencio, Montañita y Pastos expresados en lámina (mm y ⁻¹)	84

Glosario.

Balance hídrico: Es un método que analiza las entradas y salidas de agua de un espacio territorial a lo largo del tiempo. Su principio se basa en la conservación de masas de agua.

Bosque Húmedo Montano Bajo: Es un ecosistema terrestre que se encuentra entre los 1.800 y 2.000 m.s.n.m. y se caracteriza por ser una zona es muy productiva. Sin embargo, en ella se han destruido los bosques protectores y las cuencas de los ríos presentan muchos problemas en la temporada seca.

Bosques andinos: Son ecosistemas boscosos de montaña con un rango de elevación que va de los 1.000 m.s.n.m. a la línea superior del bosque. Están caracterizados por su alta diversidad y endemismo y parte de su importancia radica en los servicios ecosistémicos que prestan, como el abastecimiento de agua, la fertilidad de los suelos, el almacenamiento de carbono, entre otros.

Caudal base: Parte del caudal aportado por las reservas de una cuenca, en particular las subterráneas, que se mantiene fuera de periodos de lluvia o de fusión de nieves y que tiende a confundirse con el caudal de agotamiento.

Caudal rápido o de tormenta: Es el volumen de agua que corresponde a los excesos de agua derivados de las tormentas.

Caudal: Es el volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados. Se refiere fundamentalmente al volumen hidráulico de la escorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma.

Conductividad hidráulica: Es la medida que describe la capacidad de un suelo para permitir el paso de fluidos a través de su estructura, generalmente el agua.

Cuenca hidrográfica: Es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que sus aguas dan al mar a través de un río o que vierte sus aguas a un único lago endorreico.

Curvas de duración de caudales: Es una curva que indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Además, esta curva también indica el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia.

Deforestación: Es la pérdida de bosques y selvas debido al impacto de actividades humanas o causas naturales.

Densidad del suelo: Este término hace referencia al peso por volumen del suelo. Existen dos tipos de densidad, real y aparente. La primera está relacionada con las partículas densas del suelo, su valor está alrededor de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Con respecto a la segunda, está se refiere a la relación entre la masa de suelo por unidad de volumen (g/cm^3).

Ecohidrología: Es un término científico que representa una nueva aproximación a la restauración y gestión sustentable del recurso hídrico y provee una herramienta adicional para la administración de la degradación ecológica del agua y de sus procesos en la superficie. Adicionalmente, este concepto considera las interrelaciones funcionales entre la hidrología, los procesos involucrados en un ecosistema y su biota, dirigidas al manejo equilibrado de los ecosistemas en general.

Escorrentía: Es un proceso físico que consiste en el escurrimiento del agua de lluvia por la red de drenaje hasta alcanzar la red fluvial.

Escorrentía superficial: Es la precipitación que sobre la superficie del terreno discurre por la acción de la gravedad sin infiltrarse en el suelo.

Escorrentía Hipodérmica o subsuperficial: Es el agua de precipitación infiltrada en el suelo que se mueve sobre los horizontes superiores y reaparece almacenado como manantial o se incorpora a la red de drenaje superficial.

Escorrentía Subterránea: es la precipitación que se filtra hasta el nivel freático circulando hasta alcanzar la red de drenaje.

Estructura del suelo: Es la forma como las partículas texturales del suelo como arena, limo y arcilla se asocian para formar agregados y a unidades de mayor tamaño nombrados por peds.

Evapotranspiración: Es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

Filtración: Proceso natural en el cual el agua superficial se filtra gradualmente a través del suelo hacia los acuíferos por acción de la fuerza de gravedad.

Hidrograma unitario: Operador funcional característico de la respuesta de una cuenca.

Humedad del suelo: Es la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno.

Humedad relativa: Es la relación entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor de equilibrio del agua a una temperatura dada. La humedad relativa depende de la temperatura y la presión del sistema de interés.

Infiltración: Es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo. La tasa de infiltración, en la ciencia del suelo, es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación o la irrigación.

Materia orgánica: Es materia elaborada de compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural.

Percolación: Se refiere al movimiento del agua dentro del suelo.

Porosidad del suelo: Se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y micro poros donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse.

Precipitación: Es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no virga, neblina ni rocío, que son formas de condensación y no de precipitación.

Rendimiento hídrico: Es la relación entre el caudal y la precipitación o la cantidad del caudal que fluye desde una cuenca, por su unidad de superficie, en un intervalo de tiempo dado.

Introducción

En los trópicos la deforestación es un hecho de preocupación e importancia ambiental. Entre 1990 – 2000 fueron deforestadas 8.6 millones de hectáreas de bosques tropicales, dejando suelos infértiles, erosionados e infestados de malezas como consecuencia de la conversión de bosques a la agricultura, a pasturas y a plantaciones sin ningún tipo de manejo ni conciencia (Chazdon, 2014). Adicionalmente en el decenio de los años 2000 el área deforestada en la zona tropical fue de 7 millones de hectáreas anuales (FAO, 2016), y en la década de 2010 de 12 millones de hectáreas (Hansen, Potapov, & Tyukavina, 2019).

En el continente africano, países como Ghana y Costa de Marfil registraron en el 2017 y 2018 el mayor aumento porcentual en hectáreas pérdidas de bosques tropicales con 60 % y 26 % respectivamente, a causa de la minería ilegal y expansión del cultivo cacao (*Theobroma cacao*). De igual forma, la república democrática del Congo reportó en 2018 un aumento del 38 % con respecto al periodo 2011 – 2017, y Madagascar perdió el 2 % de bosques tropicales, producto de la minería ilegal, tala y quema de bosques (Hansen *et al.*, 2019).

Por otra parte, en América Latina países como Ecuador reportaron en el periodo de 1990 y 2015 las mayores pérdidas de bosque primario que ascienden a 2,1 millones de hectáreas (Bonilla-Bedoya, Estrella-Bastidas, Molina, & Herrera, 2018). En el 2018 en Colombia, se reportó una tasa de crecimiento de la deforestación 9 % (14977 mil hectáreas) en comparación con el 2017, consecuencia del acuerdo de paz frente al conflicto armado (Hansen *et al.*, 2019). Sin embargo, Chazdon (2008) reportó que alrededor del mundo en 18 países la cobertura forestal ha aumentado en 13 millones de hectáreas por año, gracias a la plantación de árboles y a la regeneración natural, siendo los métodos pasivos los más usados y con los que se pueden lograr buenos resultados y son económicos, que surgen como alternativa para resolver el problema de la degradación de los suelos, por cambios en el uso y manejo de estos, además el problema de infiltración asociado a ello que conlleva a la alteración de la oferta hídrica.

Adicionalmente, varios autores han demostrado que los cambios en el uso del suelo alteran el funcionamiento hidrológico en cuencas y las dinámicas del caudal (Beck *et al.*, 2013;

Bruijnzeel *et al.*, 2006; Buytaert, Iñiguez y Bièvre, 2007; Buytaert, Wyseure, De Bièvre y Deckers, 2005; Hassler, Zimmermann, Breugel, Hall y Elsenbeer, 2011; Ochoa-tocachi, Buytaert, Bièvre y Céleri, 2016; Tobón, Bruijnzeel, Frumau y Calvo-Alvarado, 2010; Zimmermann, Elsenbeer y Moraes, 2006). Además, parece haber un efecto marcado de la desaparición de los bosques y la conversión a otros usos del suelo, sobre las propiedades hidrofísicas del suelo, como la destrucción de los poros, la compactación del suelo, la disminución de la conductividad hidráulica, el aumento de la densidad aparente, lo que genera el aumento de los eventos torrenciales durante los eventos de precipitación y una disminución en los caudales base (Drewry, Paton y Monaghan 2004; Malmer 1996; Hanson, Newhouse y Dettinger 2004; Ziegler *et al.*, 2004; Singleton y Addison 1999; Germer, Neill, Krusche y Elsenbeer, 2010; Tobón *et al.*, 2010).

La restauración ecológica cada vez tiene mayor importancia debido a la presión que el ser humano ha venido realizando hacia diferentes ecosistemas en el planeta ocasionando su degradación y cuyas causas van desde la conversión a pastizales para el pastoreo de ganado, la explotación de madera, la agricultura comercial y de subsistencia, la minería, y la expansión urbana (Aide, Zimmerman, Pascarella, Rivera, & Marcano-Vega, 2000; Etter, McAlpine, Pullar, & Possingham, 2005; Holl, 2013), en algunos casos se supera la capacidad de carga, alterando su funcionamiento y volviéndolos improductivos o haciendo que se pierdan las funciones ecológicas y servicios ecosistémicos que estos brindaban. Existen tierras deforestadas que han sido abandonadas, donde se van desarrollando procesos de sucesión a rastrojos y a bosques secundarios, los cuales parecen jugar un papel importante en la restauración de los procesos y de los servicios ecosistémicos, además de la restauración de la biodiversidad (Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015; Etter *et al.*, 2005; Holl, 2002; Zhang, Yang y Zepp, 2004).

Aunque, existen programas de restauración que parecen ser exitosos en el establecimiento de las plántulas y en algunos casos en el desarrollo de nueva vegetación, por ende en restaurar el componente vegetal; hay muy pocos estudios donde se haya llevado a cabo un seguimiento de los cambios físicos que se presentan en los nuevos ecosistemas y la velocidad de estos cambios, especialmente relacionados con el funcionamiento ecohidrológico de los ecosistemas y la restauración de las propiedades del suelo (Aide *et al.*, 2000; Murcia *et al.*, 2016; Suganuma y Durigan, 2015; Tobón *et al.*, 2010; Lozano-Baez *et al.*, 2018). Por lo cual se requiere más investigación sobre el tema conjunto vegetación-

hidrología-suelo en zonas donde se desarrollan procesos de restauración, que permitan conocer los efectos de los programas de restauración, más allá del establecimiento y desarrollo de nueva vegetación, es decir, que permitan conocer el funcionamiento de los ecosistemas emergentes en el siglo 21 y sus servicios ambientales.

De acuerdo con lo anterior, este estudio busca generar nueva información relacionada con el papel de la restauración de los bosques sobre las propiedades hidrofísicas del suelo y el funcionamiento ecohidrológico de los ecosistemas emergentes, con el fin de aportar información necesaria para los entes gubernamentales y ambientales enfocados en el recurso hídrico y poder así tomar decisiones con respecto a la restauración de los ecosistemas, que han sido degradados.

En concordancia, con esta investigación se busca responder la siguiente pregunta:

¿Cuáles son los efectos ecohidrológicos de la restauración ecológica del Bosque Húmedo Montano Bajo?

HIPÓTESIS

La restauración de los bosques en cuencas hidrográficas degradadas implicará un aumento de la porosidad y materia orgánica del suelo. Lo cual genera un incremento de la conductividad hidráulica e infiltración de la precipitación. Aunque también causa una disminución en el rendimiento hídrico y en los caudales de tormenta o caudales pico, lo que a su vez permite el aumento del caudal base. Es decir, se modifica la respuesta hídrica de las cuencas asociada a estos nuevos ecosistemas.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar los procesos ecohidrológicos en cuencas hidrográficas de Bosque Húmedo Montano Bajo sometidas a restauración ecológica, frente a aquellas bajo pasturas y caracterizar las variables que determinan dichos procesos en los ecosistemas emergentes.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los procesos ecohidrológicos en cuencas con vegetación en diferentes estados sucesionales, bajo un programa de restauración ecológica.
- Determinar y cuantificar la magnitud de las variables que controlan el comportamiento ecohidrológico, en cuencas con vegetación en diferentes estados sucesionales, y evaluar los efectos ecohidrológicos de la restauración.
- Comparar el funcionamiento ecohidrológico de cuencas bajo programas de restauración ecológica frente a una cuenca con pastos.

2 Marco Teórico

2.1 La Restauración Ecológica

El bosque húmedo montano bajo (bh-MB) se caracteriza por tener suelos volcánicos fértiles (Fournier, 1985), este ecosistema constituye el 2,6% del territorio de Colombia y se encuentra entre los 2000 y 2500 m.s.n.m. El Valle de San Nicolas en su mayoría se clasifica como Bosque Húmedo Montano Bajo, según el análisis por deforestación y degradación de bosques realizado por Restrepo, Z., Aristizábal, C., Uribe, L. & Tobón, M. (2016) en el periodo 1986-2000 el Valle de San Nicolas fue deforestado en un 12,01%, tuvo un 2,93% de degradación, un 2,97% de recuperación, un 10,38% de reforestación y un 71.26% sin cambio. Por otra parte, según CORNARE (2018) bajo condiciones naturales en este tipo de zona de vida se desarrollan ecosistemas de bosque andino, los cuales han sido muy impactados por la deforestación y los cataloga como un área de interés e importancia para su conservación y protección.

La restauración es el proceso de intervenir un territorio que ha sido degradado en su componente de vegetación, suelos y/o aguas, de tal manera que con el tiempo se pueda imitar la estructura, función, diversidad y dinámica del ecosistema específico a restaurar (Finegan, 1993; Aguirre, Torres, & Velasco-Linares, 2013; Cabrera & Ramírez, 2014; Sukanuma & Durigan, 2015), aun cuando existe un nivel de degradación por debajo del cual no habrá recuperación (Finegan 1993; Machlis 1993). Otra definición presentada por Benayas, Newton, Diaz, & Bullock (2009), es que la restauración ecológica consiste en ayudar a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido, sobre todo por el impacto de las actividades humanas.

Dentro de la restauración se pueden seguir dos caminos; uno es asistir al ecosistema para que se logren desarrollar los procesos de recuperación y propiciar las condiciones para superar las barreras de la regeneración natural (activa). El otro camino es permitir el desarrollo natural de la vegetación (pasiva) (Aguirre *et al.*, 2013; Vargas, 2007) o poner fin a la actividad de daño, por ejemplo, el abandono de tierras agrícolas (restauración pasiva) (Benayas *et al.*, 2009).

Actualmente, debido a la importancia que tiene este tema, los programas de restauración ecológica están recibiendo cada vez más atención y apoyo por parte de los gobiernos, por los compromisos de políticas mundiales, tales como el Convenio sobre la Diversidad Biológica. Además, la restauración ecológica conlleva a una mejor calidad de vida de los seres humanos (Benayas *et al.*, 2009), debido a que existe una estrecha relación con los servicios ecosistémicos que incluyen: el almacenamiento de carbono, la regulación del clima y el flujo de agua, suministro de agua potable y el mantenimiento de la fertilidad del suelo.

2.2 Funcionamiento ecohidrológico en cuencas hidrográficas

El aporte total de agua desde una cuenca o rendimiento hídrico, normalmente se incrementa con la deforestación, de acuerdo con el porcentaje de biomasa forestal removida, obteniéndose el máximo rendimiento en el aporte hídrico cuando el bosque es talado completamente, debido a que no hay salidas de agua a la atmósfera dadas por la evapotranspiración (Molina, Vanacker, Balthazar, Mora, & Govers, 2012; Price, 2011; Van Der Salm, Denier Van Der Gon, Wieggers, Bleeker, & Van Den Toorn, 2006). Existen estudios realizados en diferentes ecosistemas en los que se encuentra que el cambio de cobertura vegetal afecta directamente la respuesta hídrica de sus cuencas asociadas y donde el máximo rendimiento se refleja cuando hay una remoción completa de la cobertura (Andréassian, 2004; Barrero Rojas, 2014; Bruijnzeel, 2004; Ghimire, Bonell, Bruijnzeel, Coles, & Lubczynski, 2013). Meunier (1996), encontró una relación de 1 a 10 entre los caudales máximos de una cuenca reforestada comparado con una cuenca denudada; a su vez la cubierta forestal desempeñó una función niveladora de las lluvias. Bruijnzeel *et al.*

(2006) encontraron que el cambio de cobertura de bosque de niebla por pastos tiende a aumentar las cantidades anuales de caudales y precisan que no solo conduce a efectos en el caudal, sino también el deterioro de la calidad del agua, el aumento de la erosión del suelo, los riesgos de deslizamientos y la pérdida de biodiversidad, precisando la importancia de realizar una evaluación más holística de las consecuencias de la remoción de los bosques. En otro estudio se evidencia que los efectos de la tala aumentan los caudales bajos, y que la reforestación los disminuye, el estudio se realizó a dos cuencas controladas durante 16 años después de la reforestación con eucaliptos y pinos, donde en los primeros años de la reforestación se evidenció que los cursos de agua se secaron y a los 9 y 12 años hubo flujo de agua nuevamente (Andréassian, 2004).

El caudal base es el flujo de agua que se mantiene en el tiempo seco, donde a través de las vías del subsuelo el agua subterránea sostiene el flujo de los canales. Este depende fundamentalmente de la geomorfología fluvial, los suelos, el uso de la tierra y el clima (Huang, Shi, Fang, & Li, 2016). La principal característica a corto plazo de la recuperación del bosque después de la deforestación, es la disminución de los caudales totales, relacionada con los nuevos valores de evapotranspiración por el bosque emergente; a medida de que se da la recuperación va aumentando la infiltración de la precipitación, se regulan los caudales presentándose picos de respuesta (caudales de tormenta) menores y por ende se presenta nuevamente caudales base regulados (Robinson *et al.*, 2003).

Por lo tanto, en la medida que se recuperan ecológicamente los bosques, la mayor parte del incremento anual en el aporte hídrico se presenta como flujo base (flujo en épocas de sequía), especialmente cuando se recupera la capacidad de infiltración de los suelos y por ende se pueden recargar los acuíferos durante los períodos de lluvia (Asbjornsen *et al.*, 2011; Bruijnzeel, 2004; Perkins, Nimmo, Medeiros, Szutu y von Allmen, 2014; Tobón *et al.*, 2010). Por otra parte, aumentan los valores de variables como la interceptación de la precipitación y la evapotranspiración por el ecosistema emergente (Bruijnzeel *et al.*, 2006; Molina *et al.*, 2012). Cabe resaltar que la interceptación es la parte de la precipitación que es retenida por una superficie y que se evapora desde la misma sin intervenir en los procesos siguientes que ocurren con la precipitación cuando esta impacta el suelo (Flores *et al.*, 2016).

2.3 La infiltración y su relación con las propiedades del suelo

El flujo de agua que se desplaza por los canales de una cuenca es dependiente del proceso de infiltración, a su vez este proceso está regulado por las propiedades hidráulicas del suelo (retención de humedad y conductividad); seguidamente dichas propiedades están influenciadas por la textura (composición granular) que es una propiedad más bien estática, es decir, no cambia corto tiempo; y la estructura (disposición de partículas y poros del suelo) que contraria a la anterior, presenta variaciones en el tiempo, según el tipo de suelo y su manejo (Stolte, 2003).

El proceso de infiltración empieza desde que se presenta un evento de precipitación, ya sea directa o indirectamente (flujo por el fuste o por las hojas). Una parte permanece en las hojas, dosel y hojarasca (intercepción) donde se evapora. El agua que llega a la superficie del suelo tiene dos caminos: se almacena en micro-depresiones para luego infiltrarse en el perfil del suelo o escurre hacia los canales (flujos superficiales) (Stolte, 2003). Estos procesos claramente son influenciados por las características del suelo, por lo cual si un suelo presenta un cambio agresivo en su uso, reduce la capacidad de infiltración y afecta directamente el mantenimiento del caudal base (Krishnaswamy *et al.*, 2013). Estudios publicados en el sur de China, Corea del Sur y el suroeste de la India sustentan los efectos positivos en la infiltración luego de reforestar, aunque el mecanismo de compensación es posible siempre y cuando la situación inicial esté suficientemente degradada y el sitio reciba una abundante precipitación (Ghimire, Bruijnzeel, Lubczynski y Bonell, 2014).

Otra característica que influye en la capacidad de infiltración, así como también en la retención de agua y la conductividad hidráulica de un suelo es la porosidad. El ambiente del bosque propicia condiciones para que se formen los poros en el suelo, debido al movimiento de los organismos a través de este, se crean conductos que facilitan el movimiento de agua en el suelo y la capacidad de almacenar agua en los acuíferos; aunque no solo los organismos son protagonistas de este proceso, también lo es la vegetación, donde las raíces (específicamente las finas) penetran las capas del suelo y debido a su corto tiempo de vida, dejan pequeños conductos en los cuales se retiene el

agua y se mantiene la humedad del suelo (Tobón Marín, 1999; Torres, Fuentes-Ponce, Herrera, & De León, 2013). Sin embargo, estos conductos deben estar interconectados de forma que puedan tener relación con el proceso de infiltración (Bienes, Marques, Sastre, García-Díaz, & Ruiz-Colmenero, 2016). El almacenamiento de agua en el suelo se relaciona directamente con los micro y mesoporos, en cambio la conducción de agua a través del perfil del suelo está ligada a los macroporos (Alaoui, Lipiec, & Gerke, 2011a).

La conductividad hidráulica saturada (K_s), es una propiedad que determina la velocidad con la que el agua puede moverse a través de la matriz del suelo en condiciones saturadas, valores bajos en la superficie o en una profundidad superficial dificultan la percolación vertical (Hassler *et al.*, 2011). Un estudio en condiciones de pastoreo encontró reducciones en K_s cerca de la superficie, además la macroporosidad se ve reducida significativamente por pisoteo del ganado y la actividad faunística del suelo se ve debilitada después de talar y quemar el bosque, consecuentemente existe una pérdida de la materia orgánica (Ghimire *et al.*, 2014). Además la conversión de bosques a pasturas conlleva a aumentos en la densidad aparente y en la resistencia a la penetración, y a su vez una disminución de la porosidad, las tasas de infiltración y la conductividad hidráulica (Germer *et al.*, 2010; Reiners, Bouwman, Parsons y Keller, 1994; Zimmermann *et al.*, 2006).

La relación entre la materia orgánica (MO) y la infiltración es directamente proporcional, es decir, cuando hay altas cantidades de MO la tasa de infiltración aumenta; aunque ello depende del manejo y de la presencia de capas compactadas dentro del perfil del suelo. Estudios han evidenciado dicha relación, donde le han aplicado a un suelo franco arenoso 10 T ha^{-1} de abono verde y se generó un aumento en la tasa de infiltración. En otro suelo, con un manejo por más de 55 años, encuentran aumentos en la conductividad hidráulica a saturación en los tratamientos donde hubo un mayor aporte de MO; además en suelos con diferentes manejos, se encuentra que al adicionar MO los macroporos del suelo aumentan (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008).

2.4 Impactos de la restauración ecológica en las propiedades del suelo

Los cambios en el uso del suelo han generado problemas como: la degradación forestal, la deforestación, la agricultura y la ganadería intensiva (Keenan *et al.*, 2015). Debido a esta problemática, surge la restauración ecológica como un proceso que permite mejorar el bienestar humano mediante la captura de carbono y la recuperación de la biodiversidad de los bosques; así como su funcionamiento hidrológico el cual ha sido degradado por el impacto de las actividades humanas (Suding *et al.*, 2015; Chazdon *et al.*, 2017).

A nivel mundial los programas de restauración implementados en áreas forestales contribuyen a la recuperación del suelo. Sin embargo, las respuestas de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo derivadas de este proceso son prácticamente desconocidas (Mendes *et al.*, 2019). En Colombia el 80% de los ecosistemas naturales han sido deforestados para el establecimiento de cultivos ilícitos, minería y ganadería (Etter *et al.*, 2020). Frente a este panorama, el Gobierno Nacional anunció en el año 2020 la siembra de 180 millones de árboles hasta el año 2022 para recuperar las áreas degradadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020) y se basará en el Plan Nacional de Restauración para realizar el seguimiento a los ecosistemas restaurados (Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015) en cuanto a la composición de especies y diversidad estructural (Mendes *et al.*, 2019). No obstante, en este tipo de proyectos es necesario incluir parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, ya que estos proporcionan una radiografía del funcionamiento hidrológico de estos sitios (Zimmermann *et al.*, 2006; Lozano-baez *et al.*, 2021).

Por ejemplo, la determinación de los parámetros físicos del suelo (estructura, textura, densidad aparente, porosidad y humedad del suelo) son importantes porque brindan información sobre los factores que afectan el movimiento del agua y el aire a través del suelo (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2016). Los parámetros químicos del suelo (Materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, etc.) brindan información sobre la disponibilidad de nutrientes para la producción forestal (Mendes *et al.*, 2019). Los parámetros biológicos del suelo (Macro, meso y microfauna) dan información del secuestro de carbono (Keesstra *et al.*, 2016). Los autores Murcia y Guariguata (2014) expresan que gran parte de los

proyectos de restauración que se ejecutan en Colombia no consideran ningún parámetro del suelo, por lo que persisten inquietudes como: ¿Cómo se han abordado las propiedades del suelo durante el proceso de restauración?; ¿Qué tipo de propiedades del suelo se utilizan?; ¿Cuáles son las regiones de Colombia donde se han medido las propiedades del suelo durante el proceso de restauración ecológica?; etc.

3 Métodos

3.1 Localización y caracterización de las zonas de estudio

La investigación se llevó a cabo entre los meses de julio de 2017 a octubre de 2018, en el municipio de El Retiro (Antioquia). Para el estudio se seleccionaron tres cuencas hidrográficas zona rural del municipio El Retiro, el cual hace parte del Valle de San Nicolas. Dos de ellas han estado bajo un programa de restauración pasiva, en la Reserva Biológica El Silencio, perteneciente a la Fundación Natura, una se encontraba en un estado de mayor cobertura vegetal (Montañita) y la otra con gran extensión en cobertura de pastos (El Silencio). La tercera cuenca se ubica en la vereda La Cecilia (El retiro), la cual presenta un uso de pasturas degradadas con ganadería intensiva (Tabla 3-3-1). Adicionalmente a las cuencas seleccionadas para el desarrollo de esta investigación, se determinaron parámetros físicos del suelo en el sitio (Bosque Natural); los cuales serán los valores de referencia para realizar comparaciones múltiples entres sitios.

En relación con la clasificación de Holdridge, los sitios seleccionados pertenecen a Bosque Húmedo Montano Bajo, la temperatura promedio osciló entre 14 y 15 °C y la precipitación media anual fue de 2062 mm (DAP, 2016). La tabla 3.1 contiene las características de las cuencas de estudio.

Tabla 3.1: Ubicación y generalidades del sitio de estudio.

	Cuenca El Silencio	Cuenca Montañita	Cuenca Pastos
Altitud (m.s.n.m.)	2438 - 2687	2441 - 2726	2200 - 2459
Coordenadas	6°0'29,949" N 75°31'33,644" W	6°0'35,013" N 75°31'56,281" W	6°2'15,594" N 75°31'13,944" W
Área (Km²)	0,332	0,468	0,296
Ordenes Suelos	Andisoles e Inceptisoles. ^(a)	Andisoles e Inceptisoles. ^(a)	Andisoles, Inceptisoles y Entisoles. ^(a)
Especies	<i>Cyathea sp.</i> , <i>Miconia caudata</i> , <i>Clethra fagifolia</i> , <i>Ladenbergia macrocarpa</i> , <i>Drymis granadesis</i> , <i>Ocotea sp.</i> , <i>Ageratina popayanensis</i> , <i>Escallonia sp.</i> , <i>Weinmannia tomentosa</i> L.f., <i>Tibouchina lepidota</i> , <i>Laurus nobilis</i> , <i>Cecropia peltata</i> L., <i>Cecropia telenitida</i> , <i>Quercus humboldtii</i> , <i>Verbesina crassiramea</i> , <i>Eugenia sp.</i> , <i>Croton magdalenensis</i> , <i>Retrophyllum rospigliosii</i> , <i>Persea caerulea</i> , <i>Clusia alata</i> , <i>Citharexylum subflavescens</i> , <i>Sambucus peruviana</i> . ^(b)	<i>Retrophyllum rospigliosii</i> , <i>Eugenia sp.</i> , <i>Oreopanax sp.</i> , <i>Ocotea sp.</i> , <i>Meriania nobilis</i> Triana., <i>Clusia alata</i> , <i>Quercus humboldtii</i> , <i>Croton magdalenensis</i> , <i>Verbesina crassiramea</i> , <i>Befaria aestuans</i> , <i>Clusia sp.</i> , <i>Faramea sp.</i> , <i>Miconia caudata</i> , <i>Ilex caliana</i> , <i>Ladenbergia macrocarpa</i> , <i>Guateria sp.</i> , <i>Alchornea acutifolia</i> , <i>Cyathea sp.</i> ^(b)	<i>Spartina densiflora</i> , <i>Anthoxanthum Odorum</i> , <i>Holcus lanatus</i> y <i>Pennisetum clandestinum</i> .

^(a) (IGAC, 2007). ^(b) (Fundación Natura, 2016).

Se eligieron tres cuencas, las cuales tienen diferentes tipos de cobertura vegetal, a saber:

3.1.1 Cuenca El Silencio.

Es una cuenca hidrográfica que estuvo con uso en pasturas hasta el año 2012, cuando es abandonada totalmente e inicia un proceso de restauración, mediante la regeneración natural de la vegetación, o restauración pasiva, con algunas intervenciones para el enriquecimiento de especies (Fundación Natura, 2016). El estado histórico de la cuenca se presenta en la figura 3.1, donde predominan los pastos y los helechos, aunque en su parte alta se presentan pequeños fragmentos de bosques y vegetación secundaria (a.). En el año 2018 (Figura 3.1b), se puede evidenciar la transformación de los sitios presentes, donde ya existe un mosaico de pastos con rastrojos bajos, siendo predominante este último.

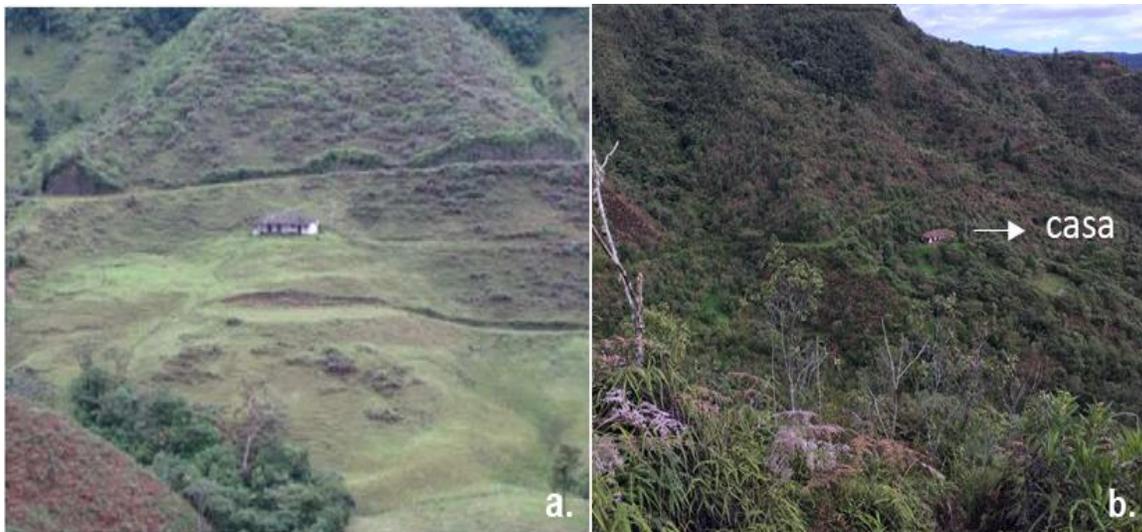


Figura 3.1: El estado de la microcuenca de la quebrada La Miel (cuenca El Silencio) en el año 2012 (a) y el proceso de restauración para el año 2018 (b).

3.1.2 Cuenca Montañita.

Es una cuenca hidrográfica que tiene parches de bosque de hasta 30 años y rastrojos abandonados de hasta más de 15 años, como resultado del proceso de restauración pasiva antes de la suspensión en el año 2010 de su uso en pastos con ganadería. Su

estado inicial se puede apreciar en la figura 3.2a, en la cual se evidencia que tenía varios sitios con pastos enmalezados, pero también zonas con relictos de bosques altoandinos. En la actualidad (Figura 3.2b), varios sitios en la cuenca tienen coberturas con un mayor porte y hay más densidad, además los sitios con mosaicos de pastos ya se encuentran con muchas más especies nativas, o regeneración natural. En la parte alta presenta bosques multiestratificados y fragmentos de bosque alrededor de los cauces.

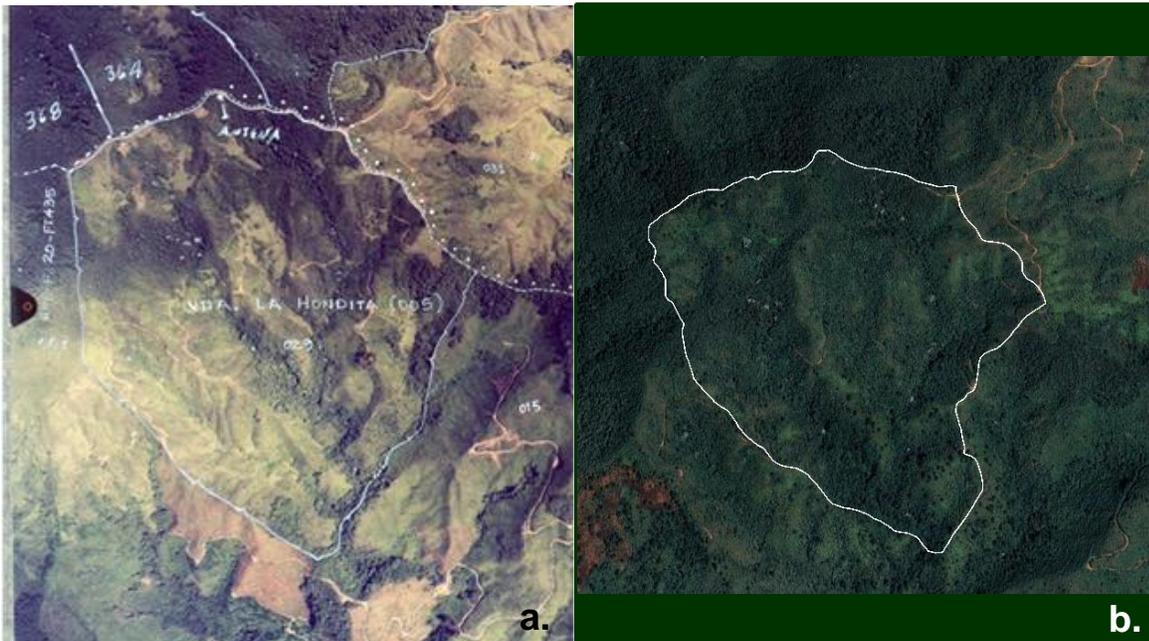


Figura 3.2: Imagen satelital de la cuenca Montañita en el año 2007 (izquierda) y 2020 (derecha).

A continuación, en la figura 3.3 se muestran las curvas de nivel, los drenajes naturales, puntos de cierre y la distribución espacial de las calicatas de observación, pluviógrafos, estaciones de humedad y meteorológicas al interior de las cuencas El Silencio y Montañita.

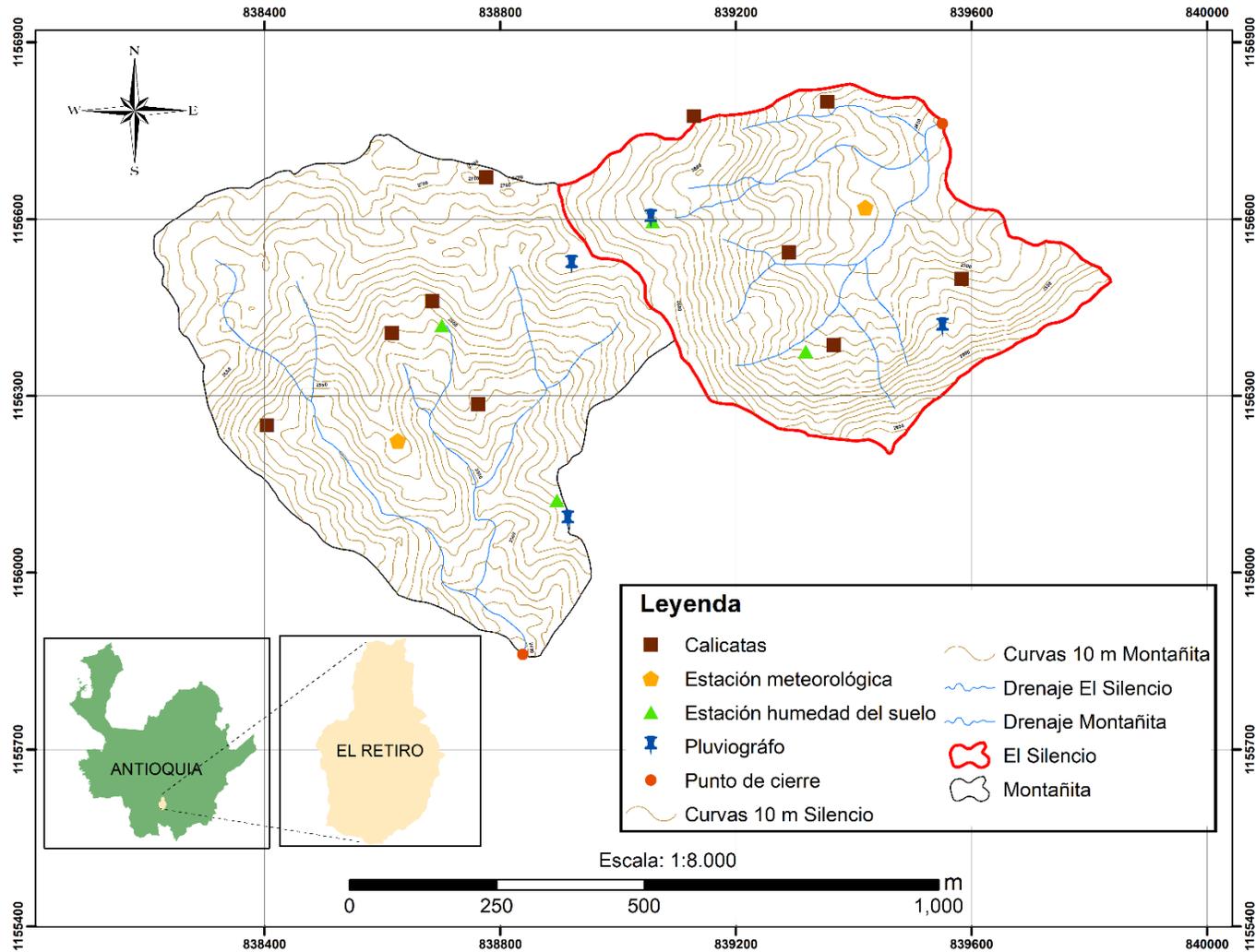


Figura 3.3: Mapa cuencas hidrográficas Montañoita (lado izquierdo) y El Silencio (lado derecho).

3.1.3 Cuenca Pastos.

Es una cuenca hidrográfica cuyo principal uso del suelo son los pastos para ganadería intensiva (Figura 3.4), pero en fechas anteriores fueron establecidos cultivos transitorios como papa (*solanum tuberosum*), maíz (*Zea mays*), etc. Esta cuenca tiene una extensión de 29,6 ha, de los cuales más del 60 % tiene cobertura de pastos, por lo que se escoge como el punto de referencia de las demás cuencas o línea base, en la medida que tanto la cuenca El Silencio como Montañita, partieron de un uso en pastos, en el momento de su abandono.



Figura 3.4: Estado de la Cuenca de Pastos. Uso actual (2019) en ganadería intensiva (a). Vista panorámica de la cuenca (b).

En la figura 3.5 se muestran las curvas de nivel a 10 m, el drenaje natural, punto de cierre y la distribución espacial de las calicatas de observación, pluviógrafos (P1 y P2), estaciones de humedad (HS1 y HS2) y meteorológicas al interior de la cuenca Pastos.

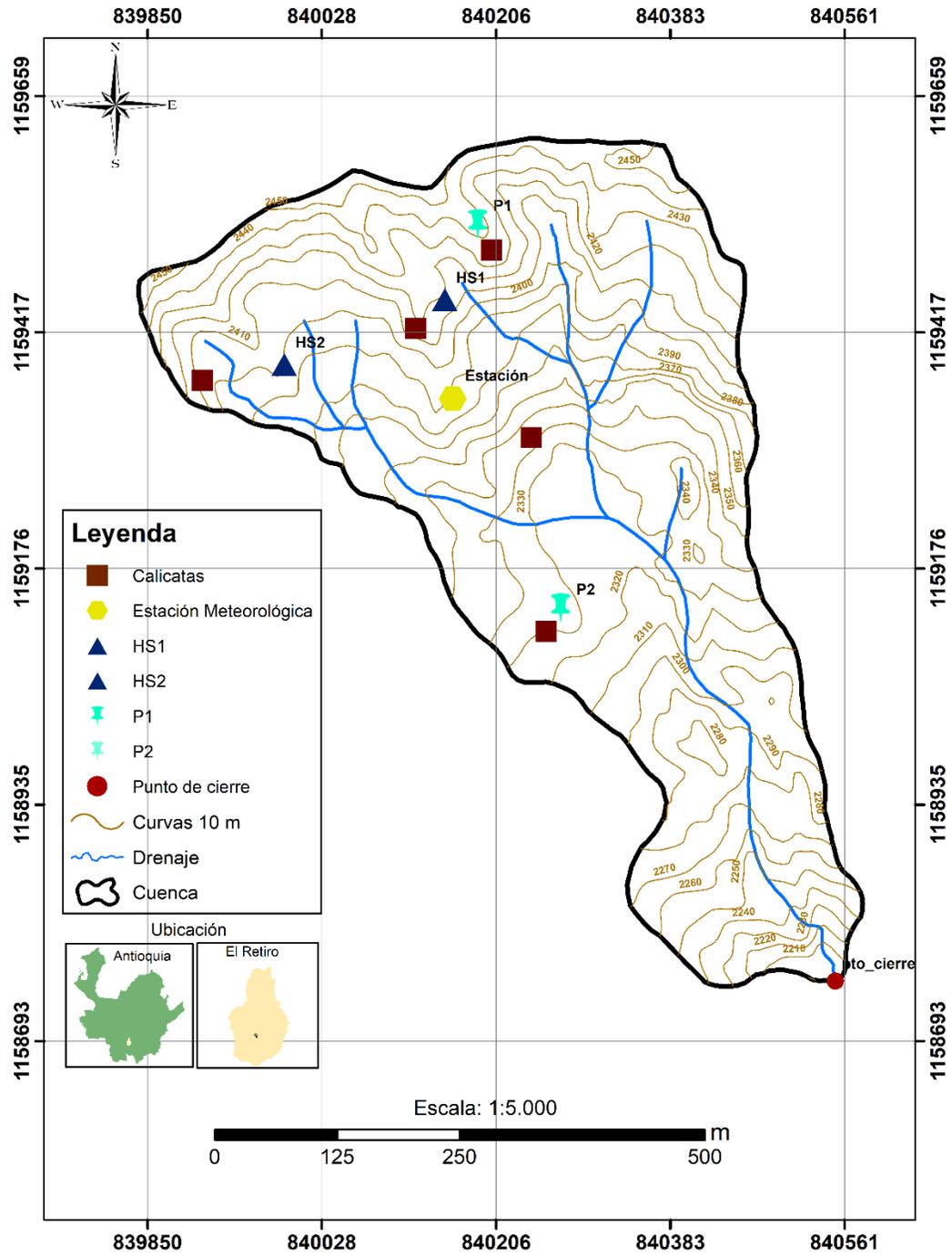


Figura 3.5: Ubicación de la cuenca hidrográfica con uso en pastos.

3.2 Morfometría de las cuencas hidrográficas.

La delimitación de las cuencas hidrográficas incluidas en esta investigación se realizó con el software SIG ArcGis 10.4.1 y la verificación del resultado se confirmó en campo. Inicialmente, los modelos de elevación digital a escala 1:10.000 suministrados por la Fundación Natura se introdujeron en la sección del software denominada **Análisis espacial - Hydrology**; luego con la información obtenida, se procesó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel y se determinaron los valores de los parámetros morfométricos.

3.2.1 Cálculo de parámetros morfométricos de la cuenca

Una vez delimitada la cuenca y definida su ubicación se procedió a la realización de los diferentes cálculos relacionados con la morfometría de cada una de las cuencas, determinando los valores de los diferentes parámetros morfométricos que caracterizan la forma de una cuenca y en parte, determinan su funcionamiento hidrológico, a saber:

3.2.1.1 Área y perímetro (A, P)

Para el cálculo de este parámetro se implementó la herramienta de cálculos de geometría en un polígono que está integrada en el Software de ArcGIS. Tanto el área como el perímetro están definidos por la superficie delimitada y correspondiente a la divisoria de aguas y su cálculo se realizó en unidades de Km².

3.2.1.2 Longitud de la cuenca (L).

Se realizó esta medición tomando como punto de referencia inicial el punto de aforo o cierre de la cuenca y la distancia más alejada a dicho punto, tomando como referencia el cauce principal en la cuenca; el trazado de una línea recta entre estos dos puntos corresponde a la Longitud de la cuenca (L).

3.2.1.3 Longitud de cauce principal (Lc).

Mediante la herramienta de medición de objetos de tipo línea en el Software de ArcGIS, se procedió a la medición de la longitud del cauce principal.

3.2.1.4 Factor de forma (K_f).

Entendido como la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca (CVC, CARDER, CRQ, Consorcio POMCA Quindío, 2017).

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (3.2)$$

3.2.1.5 Índice de compacidad o índice de Gravelius (K_c).

Relación entre el perímetro de la cuenca (P) y longitud de una circunferencia con un área igual a la de la cuenca (CVC, CARDER, CRQ, Consorcio POMCA Quindío, 2017)

$$K_c = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3.3)$$

3.2.1.6 Pendiente (%).

A partir del shape de curvas de nivel de cada una de las cuencas hidrográficas estudiadas, se utilizó la herramienta Create TIN From Features y Slope de 3D Analyst del Software de ArcGIS para determinar la pendiente.

3.2.1.7 Altitud Máxima, Mínimo y Media (m.s.n.m).

Los valores se obtuvieron mediante el procesamiento de los mapas altimétricos de cada una de las cuencas estudiadas a través del Software de ArcGIS.

3.2.1.8 Curva hipsométrica.

La determinación de las curvas hipsométricas de las cuencas hidrográficas estudiadas se realizó con el programa CalHypso, el cual funciona como una extensión del Software de ArcGIS (Seong y Choi, 2007).

3.2.1.9 Densidad de drenaje.

La densidad de drenaje es la longitud total del cauce principal dentro de una cuenca hidrográfica, dividida por el área total de drenaje. Este parámetro se expresa en km km^{-2} . (Hernando, 2001).

3.3 Clima.

En cada cuenca hidrográfica se instaló una estación meteorológica automática debidamente calibrada (Figura 3.6), la cual registró cada 15 minutos, variables como la precipitación (mm), velocidad del viento (m s^{-1}), temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%) y radiación solar (W m^{-2}). Las estaciones utilizadas fueron, estaciones tipo A: una de marca Campbell equipada con un registrador de datos CR1000 (x), la cual fue instalada en la cuenca El Silencio, y dos estaciones marca Davis (Davis Vantage Pro-2 ®), instaladas, la primera en la cuenca Montañita y la segunda en la cuenca con pastos. Las estaciones fueron instaladas en sitios completamente despejados de vegetación.

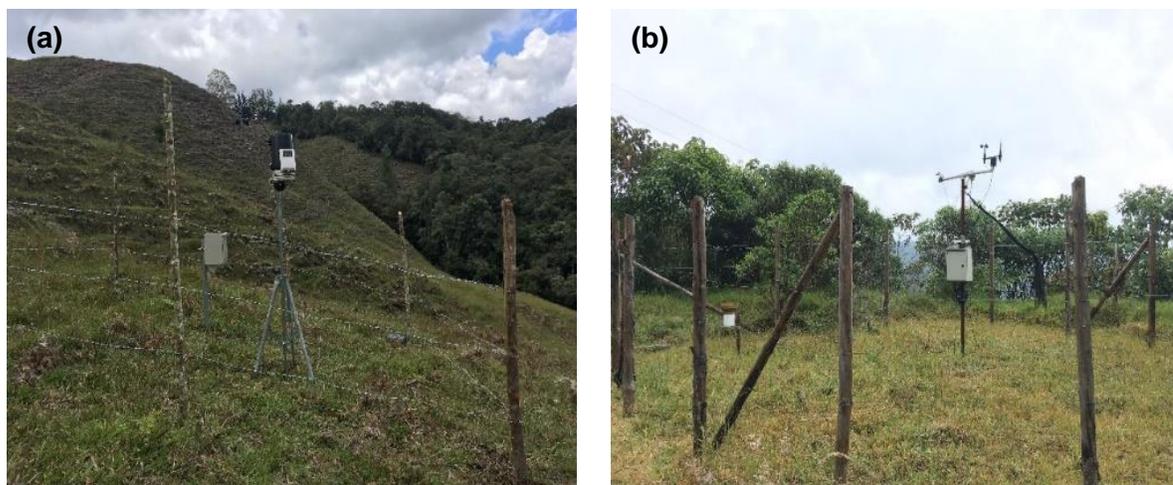


Figura 3.6: Estación meteorológica automática marca Davis - Cuenca Pastos (a) y marca Campbell – Cuenca El Silencio (b).

Igualmente en cada cuenca hidrográfica se instalaron dos pluviógrafos de cazoletas; uno marca Texas Instruments ® y otra marca Hobo (Onset ®) acoplados con dispositivos registradores de datos Tynitag (Gemini dataloggers ®) (Figura 3.7), estos instrumentos tienen una precisión de 0,2 mm de lámina de precipitación, los cuales fueron ubicados en espacios completamente abiertos y en sitios diferentes a las estaciones meteorológicas, de tal manera que se cubriera toda la variabilidad espacial de la precipitación, en cada una de las cuencas estudiadas. Durante el periodo de monitoreo la descarga de los datos se realizó cada quince días usando un computador portátil, con la información obtenida se procesaron conjuntos de datos en escalas horaria, diaria y mensual.

Las cuencas hidrográficas objeto de estudio corresponden a cuencas de cabecera, las cuales tienen un área de captación reducida, lo que se traduce en una poca variación espacial de la precipitación, por consiguiente se pueden promediar los registros de los pluviógrafos utilizando el método de la media aritmética (Pizarro, Ramírez y Flores, 2003; Vásquez Velázquez, 2016).

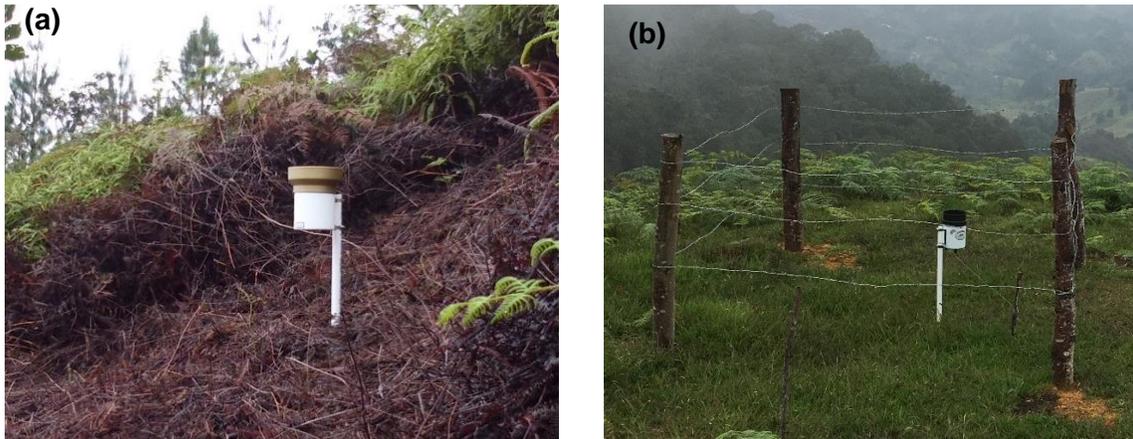


Figura 3.7: Pluviógrafos instalados en la cuenca El Silencio (a) y cuenca con Pastos (b).

3.4 Coberturas - Vegetación.

La determinación de las diferentes coberturas vegetales que presentan las cuencas hidrográficas objeto de estudio se realizó con imágenes satelitales Landsat 8 bajo la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000 propuesta por (IDEAM, IGAC, CORMAGDALENA, 2008).

3.4.1 Cuenca El Silencio.

De acuerdo con la metodología Corine Land Cover, se encontró que la cuenca El Silencio presenta en la actualidad 6 subclasificaciones que son:

1. Vegetación secundaria alta con 15,16 ha, que representa el 45,6 % del total de la cuenca.
2. Bosque denso bajo de tierra firme con 7,2 ha, que representa el 21,6 %.
3. Plantación de Pino con 4,6 ha, que representa el 13,9 %.
4. Vegetación secundaria baja con 3,8 ha, que representa el 11,6 %.
5. Bosque fragmentado con vegetación secundaria con 1,2 ha., que representa el 3,7 %.
6. Bosque de galería con 1,5 ha, que representa el 3,5 %.

Se puede notar (Figura 3.8) el avance que ha tenido la restauración en dicha cuenca, teniendo casi la mitad de la cobertura con vegetación secundaria y sin ningún espacio en pastos limpios que fue como empezó.

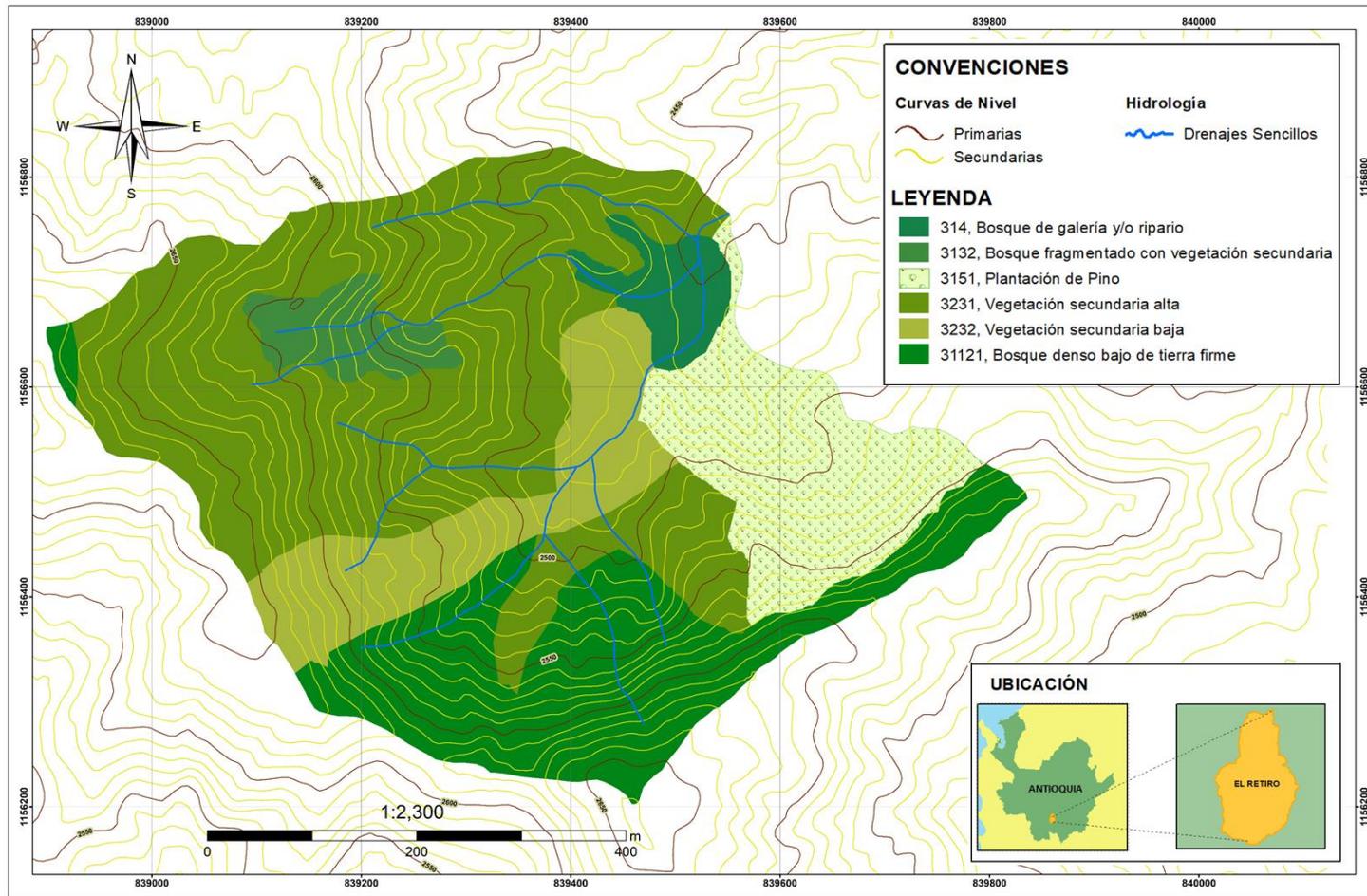


Figura 3.8: Mapa de cobertura de la cuenca El Silencio.

3.4.2 Cuenca Montañita.

La cuenca Montañita tiene 4 subclasificaciones que son:

1. Bosque denso bajo de tierra firme con 16,4 ha, que representa el 35,0 % del total de la cuenca.
2. Bosque de galería con 1,3 ha, que representa el 27,7 %.
3. Bosque fragmentado con vegetación secundaria con 10,4 ha, que representa el 22,2 %.
4. Vegetación secundaria alta con 7,0 ha, que representa el 15,0 %.

El tipo de cobertura que se presenta en la cuenca Montañita (Figura 3.9) explica el tiempo que ha estado en restauración natural, teniendo toda su extensión con coberturas de mayor porte y densidad que en la cuenca El Silencio.

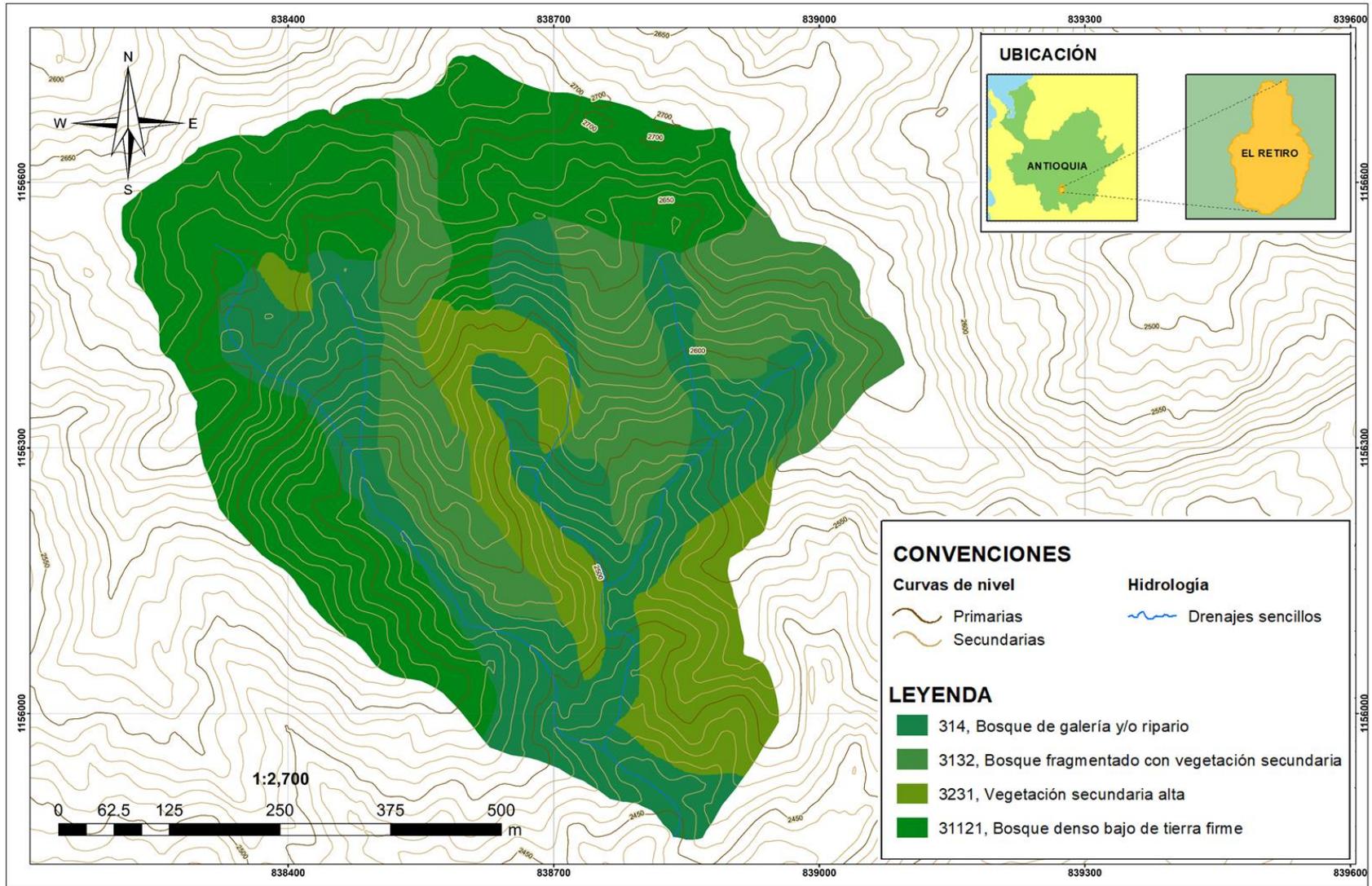


Figura 3.9: Mapa de coberturas de la cuenca Montañita.

3.4.3 Cuenca Pastos.

La cuenca Pastos tiene 4 subclasificaciones que son:

1. Pastos limpios con 19,7 ha, que representan el 66,6 % del total de la cuenca.
2. Bosque de galería con 5,3 ha, que representan el 17,9 %.
3. Bosque denso bajo de tierra firme con 4,1 ha, que representan el 14,0 %.
4. Vegetación secundaria alta con 0,4 ha, que representan el 1,4 %.

En la cuenca, los pastos representan más de la mitad de su extensión, siendo la cobertura característica y fue una de las razones principales para escogerla como sitio de estudio, esta cuenca cumplía con los requisitos de área, cobertura y altitud para ser el punto de partida de las otras dos (Figura 3.10).

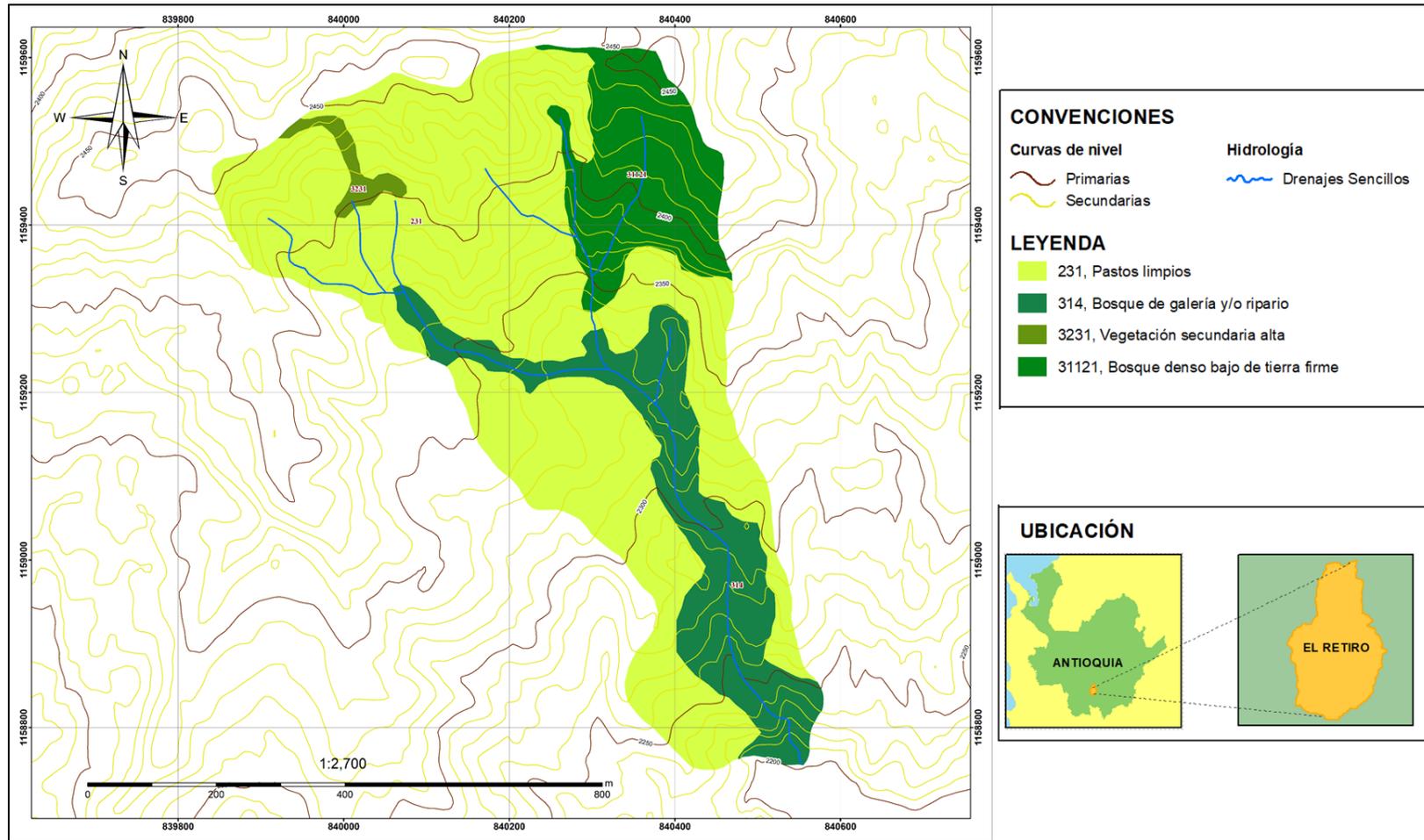


Figura 3.10: Mapa de coberturas de la cuenca Pastos.

3.5 Propiedades físicas del suelo.

Para la caracterización de las propiedades físicas del suelo, se siguió la metodología sugerida por Tobón *et al.* (2010), de tal manera que en cada cuenca y bajo cada cobertura se realizó una calicata de 1,0x1,0x1,0 m (ver ubicación en las figuras 3-3 y 3-5), donde se describieron los suelos *in situ* (color, estructura y profundidad de los horizontes) y se tomaron muestras para evaluar las siguientes propiedades:

3.5.1 Textura.

La determinación de textura se realizó recolectando muestras de suelo en cada cuenca, en 4 sitios diferentes y en cada horizonte A, B y C por duplicado (Figura 3.11), luego se determinó en el laboratorio por el método de Bouyoucos (Laboratorio de Biogeoquímica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín).



Figura 3.11: Toma de muestras de suelo para determinación de Densidad aparente (Da) y Contenido de humedad gravimétrica (CRH).

3.5.2 Densidad aparente (Da).

En la estimación de D_a se tomaron muestras de suelo inalteradas con la ayuda de anillos de acero inoxidable de 100 cm^3 para los mismos sitios anteriormente mencionados en la textura (Figura 3.11). Las muestras se pesaron y se secaron en horno a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 48 horas, para obtener el valor de la densidad se calculó como la proporción de la masa de la muestra secada al horno y el volumen del anillo utilizado (Laboratorio de Ecología, Universidad Nacional de Colombia, Medellín).

Se aplica la fórmula:

$$D_a = \frac{M_s}{V_t} \quad (3.4)$$

Donde:

D_a : Densidad aparente (g cm^{-3})

M_s : Masa de peso seco del suelo (g)

V_t : Volumen total de la muestra (cm^3)

3.5.3 Porosidad total (α).

La determinación de la porosidad total del suelo se realizó en consideración con la densidad de partículas (D_p) del suelo en cuestión y la densidad aparente, luego se aplica la fórmula:

$$\alpha = \left(1 - \frac{D_a}{D_p}\right) \times 100 \quad (3.5)$$

Donde:

α : Porosidad (%)

D_a : Densidad aparente (g cm^{-3})

D_p : Densidad real (g cm^{-3})

3.6 Propiedades hidráulicas del suelo.

Las propiedades hidráulicas del suelo (Tobón *et al.*, 2010) se determinaron para explicar el comportamiento hidrológico de las cuencas de estudio, se midieron las siguientes propiedades:

3.6.1 Infiltración.

En cada cuenca hidrográfica se midió in-situ la capacidad de infiltración de los suelos por el método del infiltrómetro de doble anillo (Mapa, 1995) en los meses de enero y febrero de 2018. La medición se realizó en 12 puntos (alto, medio y bajo) en las laderas de las cuencas, en cada uno de estos se escogió una zona libre de vegetación alta, se nivelaron los anillos, se enterraron aproximadamente 10 cm y se empleó una regla milimetrada en el anillo interno, con la cual se midió la lámina de agua infiltrada en cada lapso (5 min). Luego, se llenó con agua el anillo interno y posteriormente el externo, seguidamente se midió la velocidad con que el agua disminuyó por medio de la observación del nivel inicialmente cada 5 minutos. La prueba finaliza en el momento que el volumen de agua infiltrada se hizo constante.

3.6.2 Conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s).

En la determinación de la conductividad hidráulica se aplicó el método de mesa de saturación a carga constante (Tobón *et al.*, 2010). Para esto, se colectaron muestras de suelo en cada una de las cuencas, con la ayuda de anillos de PVC de 7,5 cm de alto y 7,5 cm de diámetro, las que fueron recolectadas en 4 sitios diferentes y en cada horizonte diagnóstico (A, B y C). Cada muestra fue envuelta en papel de aluminio y empaquetada cuidadosamente para ser transportada al laboratorio evitando la alteración del suelo. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Ecohidrología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

En laboratorio, cada muestra se puso a saturar en una bandeja con arena fina y agua, por un período de 20 días, hasta saturación completa o peso constante. Una vez determinada la existencia de saturación (por peso constante de la muestra) se llevó a cabo la

determinación de la conductividad hidráulica saturada para cada muestra. El caudal o flujo de agua a través de la muestra se calculó a partir de la ecuación de Darcy:

$$v = \frac{Q}{At} = -K_s \frac{\Delta H}{l} \quad (3.6)$$

Donde v es la velocidad a la que el agua pasa a través de la muestra de suelo ($L t^{-1}$), Q es el caudal o volumen de agua que fluye a través de la muestra de suelo, en cada intervalo de tiempo ($cm h^{-1}$), A es el área de sección del cilindro (cm), K_s es la conductividad hidráulica saturada ($L t^{-1}$), H es la carga hidráulica (L) y l es la longitud de la columna de suelo (cm).

3.6.3 Capacidad de retención de humedad.

Para la caracterización de las curvas de retención de humedad de los suelos, en cada cuenca, se recolectaron muestras de suelo inalteradas con la ayuda de anillos de acero 1 cm de alto y 5 cm de diámetro en cada cuenca, en 4 sitios diferentes y en cada horizonte A, B y C por duplicado. Las muestras fueron envueltas en papel de aluminio y transportadas al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, cuidando de no alterarlas. Una vez en laboratorio, las muestras fueron preparadas y colocadas en una bandeja con arena fina y agua, hasta lograr saturación. Luego cada muestra fue sometida a 6 puntos de succión (1, 33, 150, 500 y 1500 kPa), donde la cantidad de agua que son capaces de retener las muestras a 33 y 1500 kPa, corresponden a la capacidad de campo (CC) y a punto de marchitez permanente (PMP), respectivamente, y son usadas en este estudio, para determinar la cantidad de agua disponible en el suelo para las plantas (AD), como la diferencia entre CC – PMP, para cada muestra analizada. Por el método de la olla y plato de presión (Tobón *et al.*, 2010).

3.7 Materia orgánica.

En la determinación del contenido de materia orgánica se recolectaron muestras de suelo en cada cuenca, en 4 sitios diferentes y en los horizontes A y B por duplicado, lo cual se

fundamentó en que la actividad biológica ocurre en los primeros 50 cm del perfil del suelo. Luego en el Laboratorio de Suelos (Análisis Químicos) de la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín, se determinó el contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (1934).

3.8 Mediciones ecohidrológicas.

3.8.1 Humedad del suelo.

En cada una de las cuencas se llevó a cabo mediciones en campo de la humedad volumétrica del suelo por medio del uso de sensores de humedad en suelo TDR (Time Domain Reflectometry, Campbell Sci), instalados a diferentes profundidades dentro del perfil (5, 25, 50 y 100 cm), en dos sitios diferentes en cada una de las cuencas (Figura 3.12). Los sensores TDR fueron conectados a dataloggers Campbell CR1000 y CR200 (Campbell Sci), los cuales fueron programados para medir la humedad del suelo cada 30 segundos y registrar los valores promedios cada 15 minutos.

Las mediciones de campo mediante la técnica TDR fueron calibradas, de acuerdo con la metodología indicada por Tobón *et al.* (2010), mediante la extracción de muestras de suelo de volumen conocido (anillos de 5,0 x 5,0 cm), en cada uno de los sitios donde estaban instalados cada uno de los sensores, a las cuales se les determinó la humedad gravimétrica, comparando los valores entre los dos métodos y generando las respectivas ecuaciones de calibración (Tobón *et al.*, 2010).



Figura 3.12: Distribución espacial de los sensores de humedad del suelo (TDR, Campbell) (a) y estación de monitoreo de la humedad del suelo (b).

3.8.2 Evapotranspiración.

Para la cuantificación de la evapotranspiración se aplicó el método de Penman-Monteith o evapotranspiración de referencia (E_{To}), de acuerdo con Allen, Pereira, Raes y Smith (2006) usando los valores de las variables meteorológicas generados en cada una de las estaciones instaladas en cada cuenca y aplicando la siguiente ecuación:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p \left(\frac{e_a - e_d}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(\frac{1 + r_c}{r_a} \right)} \quad (3-7)$$

Dónde:

R_n: Radiación neta

G: flujo del calor en el suelo

($e_a - e_d$): déficit de presión de vapor del aire

ρ : densidad media del aire a presión constante

C_p: calor específico del aire

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor de saturación

γ : constante psicrométrica

r_c: resistencia superficial total

r_a: resistencia superficial aerodinámica

*En periodo diario $G = 0$, es decir, se ignora el valor del flujo de calor hacia el suelo, por ser insignificante para 24 horas.

La evapotranspiración actual o real (ET_a) fue calculada a partir de los valores de evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o), siguiendo el método indicado Allen *et al.* (2006).

3.8.3 Caudal.

Se estimó construyendo canales abiertos mejorados, tipo vertedero rectangular; los cuales fueron construidos en el lecho de las quebradas que drenan en cada cuenca, en un punto hacia la parte baja del cauce principal, o punto de cierre del drenaje. En cada vertedero se instaló un limnógrafo (Solinst ®) para medir cada 30 segundos y registrar los valores promedios cada 5 minutos, de la altura del nivel del agua. Con el fin de ajustar y calibrar las mediciones de los limnógrafos, en cada vertedero se instaló igualmente un barógrafo (Solinst ®), ubicado por fuera del lecho del río, en un punto cercano al vertedero (Figura 3.13).

Por otra parte, en los puntos de cierre se realizaron aforos por el método químico cada 20 días durante el periodo de estudio (14 meses). Con base en la información registrada por los barómetros en cada cuenca, se realizó la compensación de las lecturas de presión registradas por los limnógrafos para expresar los registros términos de lámina de agua (cm).



Figura 3.13: Vertedero abierto tipo canal mejorado, instalados en los puntos de cierre de las cuencas El Silencio, Montañita y pastos.

Para la calibración de las mediciones automáticas, en cada una de las cuencas se construyó la curva de calibración de caudales, a partir de mediciones in-situ del caudal, mediante aforos por el método del correntómetro y aforos colorimétricos para determinar la velocidad del agua en la sección de control y medición del área húmeda o perímetro húmedo.

3.8.3.1 Separación del caudal base (Q_b) y el caudal rápido (Q_r).

La separación de caudales se hizo aplicando el método del filtro digital recursivo (Nathan y MacMahon, 1990), asignando un valor inicial al parámetro alpha de 0,939, de acuerdo con una calibración previa hecha para algunos eventos durante los períodos de lluvia y los periodos relativamente secos. La cantidad de caudal por encima de la línea de separación corresponde al flujo rápido o caudal de tormenta, mientras que por debajo de la línea corresponde a caudal base en cada cuenca.

$$Q_t = \alpha q_{t-1} + \frac{(1+\alpha)}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (3.8)$$

Donde:

Q_t = caudal de escorrentía directa filtrada en el tiempo t.

q_{t-1} = caudal de escorrentía directa filtrado en el tiempo anterior t-1.

Q_t = caudal total en el tiempo t.

Q_{t-1} = caudal total en el tiempo anterior t-1.

α = Parámetro de infiltración.

3.8.3.2 Curva de duración de caudales y regulación hídrica.

3.8.3.2.1 Curvas de duración de caudales.

La curva de duración de caudales es un procedimiento que consiste en disponer los caudales (diarios) del periodo de registro disponible, en orden ascendente y el número de ocurrencias de cada valor de caudal, luego se obtiene el número de veces y el porcentaje de tiempo que se ha igualado o superado cada valor de caudal en el periodo de registro evaluado. A partir de lo anterior se construye una gráfica con los valores de caudal en la ordenada y la probabilidad de caudal que es igualado o superado en la abscisa (Raghunath, 2006).

La probabilidad de exceder o igualar el caudal se determina siguiendo la fórmula:

$$p = \frac{n}{N+1} \quad (3.9)$$

Donde:

p: probabilidad de que el evento de caudal i sea igualado o excedido (%).

n: número de orden del evento de caudal i.

N: número total de eventos de la serie.

La curva de duración de caudales medios diarios sirve para tener una aproximación del comportamiento del régimen hidrológico, la regulación de humedad en una cuenca, las características y la interacción de las condiciones geomorfológicas, geológicas, del suelo, de la vegetación, clima e intervención antrópica. Adicionalmente, permite reconocer los valores característicos de caudales medios (IDEAM, 2010).

3.8.3.2.2 Índice de retención y regulación hídrica.

El Índice de retención y regulación hídrica evalúa la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales, derivado de las interacciones entre el sistema suelo-vegetación con las condiciones climáticas y con las características físicas y morfométricas de la cuenca. Es un indicador que permite evaluar la capacidad de regulación del sistema en su conjunto (IDEAM, 2010). Los valores necesarios para el cálculo se extraen de la curva de duración de caudales medios diarios para las estaciones en cada cuenca de análisis, la estimación está dada por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio y el correspondiente al área total bajo la curva de duración de caudales diarios. La expresión es (IDEAM, 2010):

$$IRH = \frac{V_p}{V_t} \quad (3.10)$$

Donde:

IRH: índice de retención y regulación hídrica.

V_p: Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio.

V_t: Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

Con el objetivo de facilitar las comparaciones entre los diferentes valores encontrados en cada cuenca, se asigna un rango con una clasificación cualitativa como se aprecia en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Clasificación de los rangos de valores del IRH

Rango de valores del indicador	Calificación	Descripción
> 0,85	Muy alta	Muy alta retención y regulación de humedad
0,75 – 0,85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0,65 – 0,75	Moderada	Media retención y regulación de humedad media
0,50 – 0,65	Baja	Baja retención y regulación de humedad
< 0,50	Muy baja	Muy baja retención y regulación de e humedad

Tomado de: IDEAM (2010)

3.8.3.3 Índice de flujo base (IFB).

En relación con los valores de flujo base obtenidos para cada mes en cada una de las cuencas monitoreadas, se calculó el Índice de Flujo Base, IFB, como:

$$IFB = \frac{(QFB)}{Q} * 100\% \quad (3.11)$$

Donde:

QFB: caudal de flujo base diario.

Q: caudal total diario.

El IFB estimado para cada cuenca agregado mensualmente fue objeto de análisis estadístico para efectos comparativos.

3.8.3.4 Índice de estabilidad de caudales Richard Baker Flashiness Index (IBF).

El índice de estabilidad de caudales propuesto por Baker, Richards, Loftus y Kramer (2004), determina la variabilidad de los caudales diarios en función de la precipitación y el cambio generado por esta a través del tiempo. Este índice permite inferir sobre la regulación hidrológica de la cuenca, en el sentido que, frente a la incidencia de la precipitación permita mantener cambios cuantitativos reducidos, tanto en términos de aumentos y disminución. Este índice oscila entre 0 y 2, donde los valores cercanos a cero indican menor variación y mayor estabilidad, mientras que los valores lejanos indican alta variación y poca estabilidad en el régimen de caudales. Se evalúa mediante la ecuación:

$$IBF = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - Q_{i-1}|}{\sum_i^n Q_t} \quad (3.12)$$

Donde:

Q_i = Caudal de orden en una secuencia cronológica.

Q_{i-1} = Caudal de orden anterior en una secuencia cronológica de caudales.

Q_t = Caudal diario total.

3.8.3.5 Respuesta del caudal ante eventos de precipitación.

La respuesta del caudal ante eventos de precipitación representativos para todo el set de datos en cada cuenca se obtuvo mediante la selección de eventos similares en cantidad e intensidad para cada una de las cuencas en épocas de altas y bajas precipitaciones, lo cual se representó por medio de hidrogramas unitarios de la respuesta del caudal a cada evento seleccionado. Luego partiendo de ello, se analizó la forma de los gráficos y se determinó el tipo de respuesta de cada una de las cuencas ante los eventos de precipitación, en cada uno de los períodos.

3.8.4 Rendimiento Hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE)

3.8.4.1 Rendimiento Hídrico.

Con el objetivo de poder comparar la manera cómo funcionan hidrológicamente las cuencas estudiadas, se determinó el rendimiento hídrico de cada cuenca, es decir la relación entre el caudal y la precipitación o la cantidad del caudal que fluye desde una cuenca, por su unidad de superficie, en un intervalo de tiempo dado (mm y^{-1}) (IDEAM, 2010), que incluye a la precipitación media de la cuenca como un factor ponderador (Vásquez Velázquez, 2016).

$$RH = \frac{Q}{P} \quad (3.13)$$

Donde:

RH: Rendimiento hídrico

Q: Caudal total (mm y⁻¹)

P: Precipitación (mm y⁻¹).

3.8.4.2 Coeficiente de escorrentía anual (CE).

Es la relación entre el caudal de tormenta y la precipitación, e indica la fracción de la precipitación que sale de una cuenca como caudal rápido, durante los eventos de precipitación:

$$CE = \frac{Q_r}{P} \quad (3.14)$$

Donde:

CE: Coeficiente de escorrentía anual

Q: Caudal de tormenta (mm)

P: Precipitación (mm).

3.8.5 Balance hídrico.

La determinación del balance hídrico en las cuencas hidrográficas se realizó con base en la aplicación de la ecuación de continuidad o ecuación general del balance de masas (Ecuación 3.15); donde todos los factores que integran esta ecuación se expresan en

termino de lámina por unidad de tiempo (mm mes^{-1}). El uso de lámina a cambio de unidades de caudales líquidos es necesario para poder hacer comparaciones entre las cuencas monitoreadas, dadas sus áreas de captación diferentes.

$$\frac{\Delta Per}{\Delta t} = P - Q - \Delta \theta t \quad (3.15)$$

Donde:

Per: percolación profunda o agua infiltrada que recarga los acuíferos

P: Precipitación registrada (mm).

ETa: Evapotranspiración real estimada (mm).

Q: Caudal registrado (mm).

$\Delta \theta t$: Cambio de humedad del suelo en el tiempo t.

Debido a que en el presente estudio se midieron todas las variables del balance hídrico (ecuación 3.15), la ecuación de balance de masas se utilizó en esta investigación para determinar la recarga hídrica presentada durante el periodo de estudio, en cada una de las cuencas, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta Per}{\Delta t} = P - (ETa + Q + \Delta S) \quad (3.16)$$

3.9 Análisis estadístico.

Con la información climática, hidrológica, de las propiedades físicas, hidráulicas y de materia orgánica en los suelos, recolectada en cada cuenca (El Silencio, Montañita, Pastos y Bosque natural), se realizó a todos un análisis de varianza (ANOVA); después fueron examinados en cuanto a su distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk, 1965) y posteriormente solo las propiedades físicas, hidráulicas y materia orgánica fueron sometidas a la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) con el fin de valorar si existen diferencias en el comportamiento medio de cada parámetro

determinado. A su vez, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con el fin de hacer correlaciones múltiples de las variables determinadas en este estudio.

4 Resultados

4.1 Morfometría de las cuencas hidrográficas.

Los parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas monitoreadas en esta investigación se presentan en la tabla 4.1, debido a que estos factores son influyentes en la respuesta hidrológica de las cuencas, junto con el tipo de cobertura vegetal. Las tres cuencas estuvieron en un rango de área entre 0,3 y 0,5 km²; siendo Montañita la cuenca la que mayor área y perímetro presentó con 0,5 km² y 2,9 km respectivamente. La longitud de las cuencas fue similar entre Montañita (0,9 km) y Pastos (1,0 km), mientras que El Silencio tuvo un valor de 0,7 km. La longitud del cauce principal de la cuenca de El Silencio es un 31,3 % menor que el de la cuenca de Pastos y un 29,78 % menor que el de la cuenca Montañita.

Por otra parte, la pendiente media que presentaron las cuencas El Silencio y Montañita fue similar con 62,9 y 59,9 % correspondientemente; mientras que la cuenca Pastos presentó una pendiente menor con 45,1 %. De igual forma, estas dos cuencas presentaron una altitud promedio de 2500 (msnm); en contraste con la cuenca Pastos esta se encuentra ubicada en una menor altitud tiene 2329 (m s.n.m.). El factor de forma presentó un comportamiento diferente en las tres cuencas, la cuenca El Silencio sobresalió con 0,8 mientras que las cuencas de Montañita y Pastos exhiben un factor menor de 0,5 y 0,3 respectivamente. Los índices de Gravelius de las tres cuencas fluctuó entre 1,2 y 1,4 siendo Pastos la que mayor valor presentó con 1,4. Los índices de alargamiento en las tres cuencas fueron diferentes, donde la cuenca de Pastos obtuvo el mayor valor con 1,7; mientras que las cuencas de El Silencio y Montañita tienen un valor de 1,1 y 1,2 respectivamente.

Tabla 4.1: Valores de los parámetros morfométricos de las cuencas en estudio

Morfometría	El Silencio	Montañita	Pastos
Área (ha)	33,24	46,82	29,61
Perímetro (km)	2,49	2,87	2,70
Long. de la Cuenca [L] (KM)	0,66	0,95	0,96
Long. del Cauce Principal [LP] (KM)	0,69	1,11	1,06
Pendiente media (%)	62,87	59,90	45,05
Altitud Max. y min. (msnm)	2687-2438	2726-2441	2459-2200
Altitud media (msnm)	2562	2583	2329
Factor de forma [F]	0,76	0,52	0,32
Índice de Gravelius [KC]	1,21	1,17	1,39
Índice de alargamiento [IA]	1,07	1,22	1,75

La figura 4.1 muestra las curvas hipsométricas de las cuencas en estudio, de las cuales por su forma se puede inferir que son ríos jóvenes, donde sus pendientes son muy pronunciadas y sus respuestas pueden ser rápidas por la forma redondeada que presentaron. Además, no tienen valles desarrollados ni presentan sinuosidad. Adicional a ello, las cuencas según la pendiente media se pueden clasificar como relieve escarpado.

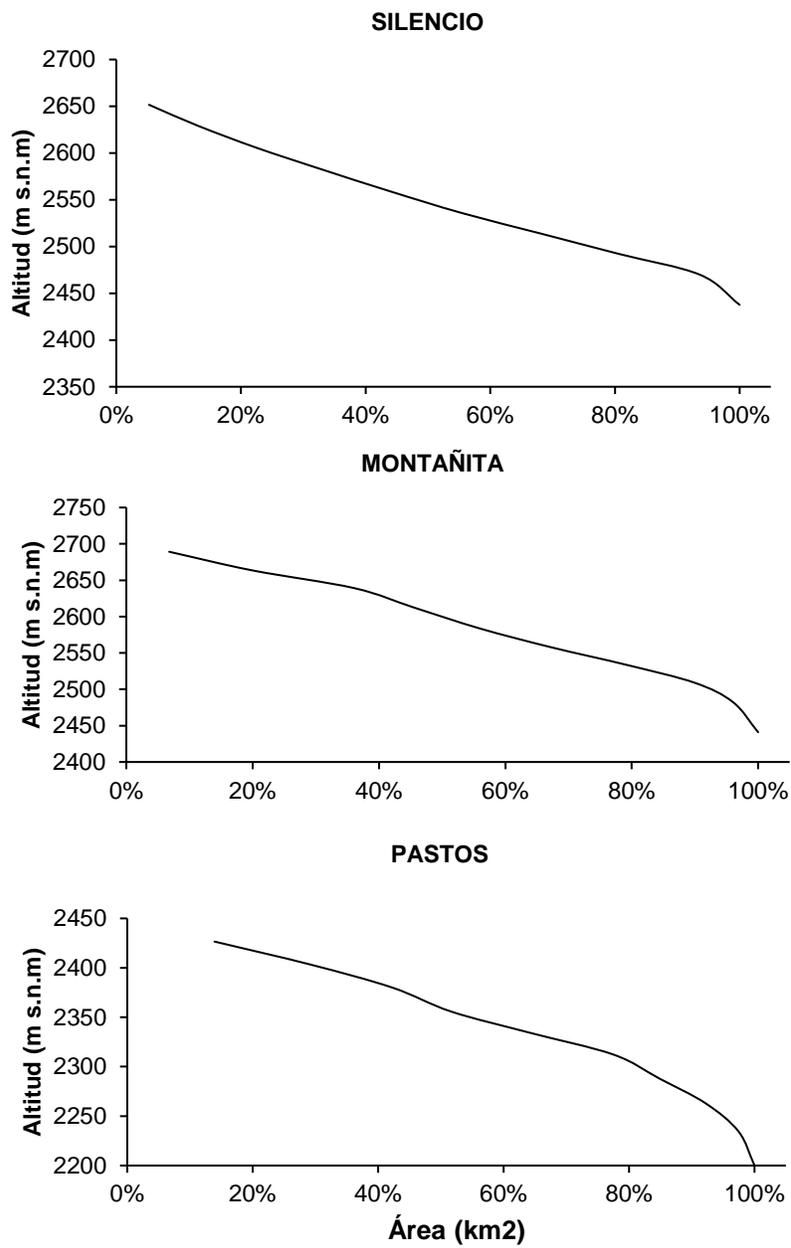


Figura 4.1: curvas hipsométricas de las cuencas hidrográficas objeto de estudio.

4.2 Clima.

- **Dinámica temporal de la precipitación y temperatura.**

El climograma de la cuenca El Silencio refleja el comportamiento de la precipitación (mm) y temperatura media (°C) durante el periodo de estudio comprendido entre el 1 de julio de 2017 hasta el 31 de octubre de 2018 presente en la figura 4.2. La mayor precipitación acumulada y la menor temperatura promedio se registraron en los trimestres de septiembre a noviembre (2017) con 1.000,2 mm y 16,1 °C; marzo a mayo (2018) con 1.185,4 mm y 16 °C y septiembre a octubre (2018) con 832,1 mm y 15,9 °C respectivamente. Contrario al comportamiento del trimestre de diciembre (2017) hasta febrero (2018) que registraron la menor precipitación acumulada y temperatura promedio con 557,3 mm y 15,7 °C respectivamente. Adicionalmente, el trimestre de junio hasta agosto (2018), registró la menor precipitación y la mayor temperatura con 546,3 mm y 16,5 °C. La precipitación media mensual en la cuenca del El Silencio proyecta una forma bimodal, lo que es característico de en la región andina.

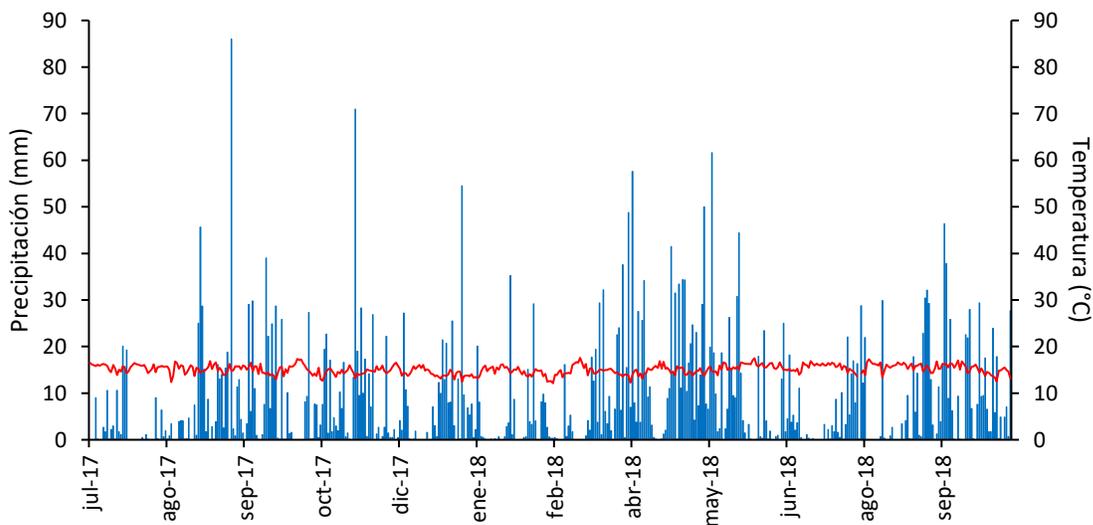


Figura 4.2: Climograma promedio anual en días en la Cuenca El Silencio.

El comportamiento de la precipitación (mm) y temperatura media (°C) en la cuenca Montañita durante el periodo de estudio del 1 de julio de 2017 hasta el 31 de octubre

de 2018 se describe en la figura 4.3. La mayor precipitación acumulada y la menor temperatura promedio se registraron en los trimestres de septiembre a noviembre (2017) con 873,8 mm y 14,9 °C; marzo a mayo (2018) con 1.209,1 mm y 14,9 °C y en el bimestre de septiembre a octubre (2018) con 570 mm y 15,1 °C respectivamente. Contrario al comportamiento de los trimestres de diciembre (2017) hasta febrero (2018) que registró una precipitación acumulada de 485,3 mm y una temperatura promedio de 16,5 °C. De igual forma, el trimestre de junio hasta agosto (2018) registró la menor precipitación acumulada con 464,8 mm y la mayor temperatura promedio con 15,7 °C.

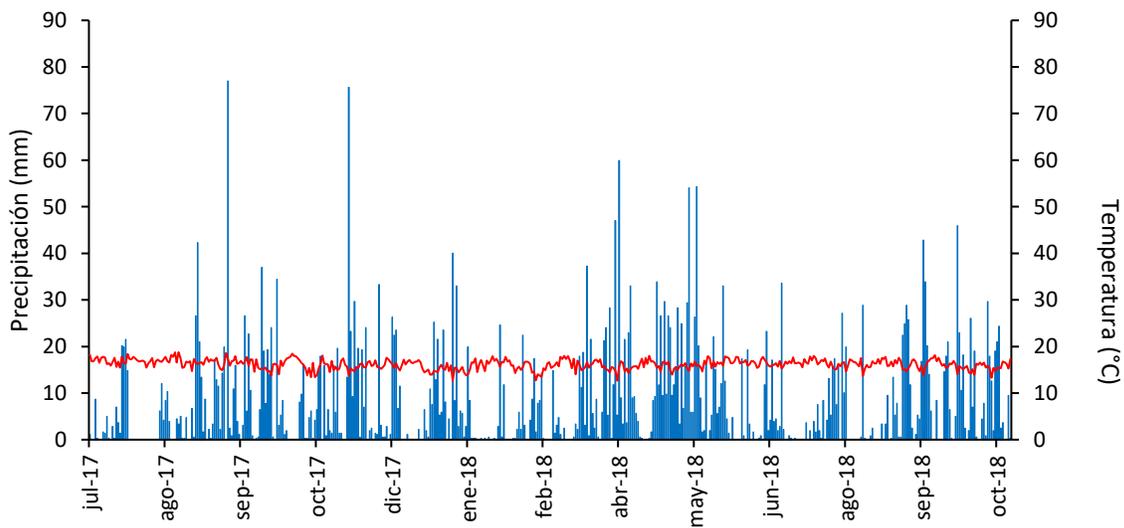


Figura 4.3: Climograma promedio anual en días en la Cuenca Montañita.

El climograma de la cuenca Pastos describe el comportamiento de la precipitación (mm) y temperatura media (°C) durante el periodo del 1 de julio de 2017 hasta el 31 de octubre de 2018 presente en la figura 4.4. La mayor precipitación acumulada y la menor temperatura promedio se registraron en los trimestres de septiembre a noviembre (2017) con 634,6 mm y 14,77 °C; marzo a mayo (2018) con 898,2 mm y 14,7 °C y septiembre a octubre (2018) con 595,2 mm y 14,6 °C respectivamente. Contrario al comportamiento del trimestre de diciembre (2017) hasta febrero (2018) que registraron la menor precipitación acumulada y temperatura promedio con 362,2 mm y 14,5 °C respectivamente. Adicionalmente, el trimestre de junio hasta agosto (2018), registró la menor precipitación y la mayor temperatura con 404,4 mm y 15,1 °C.

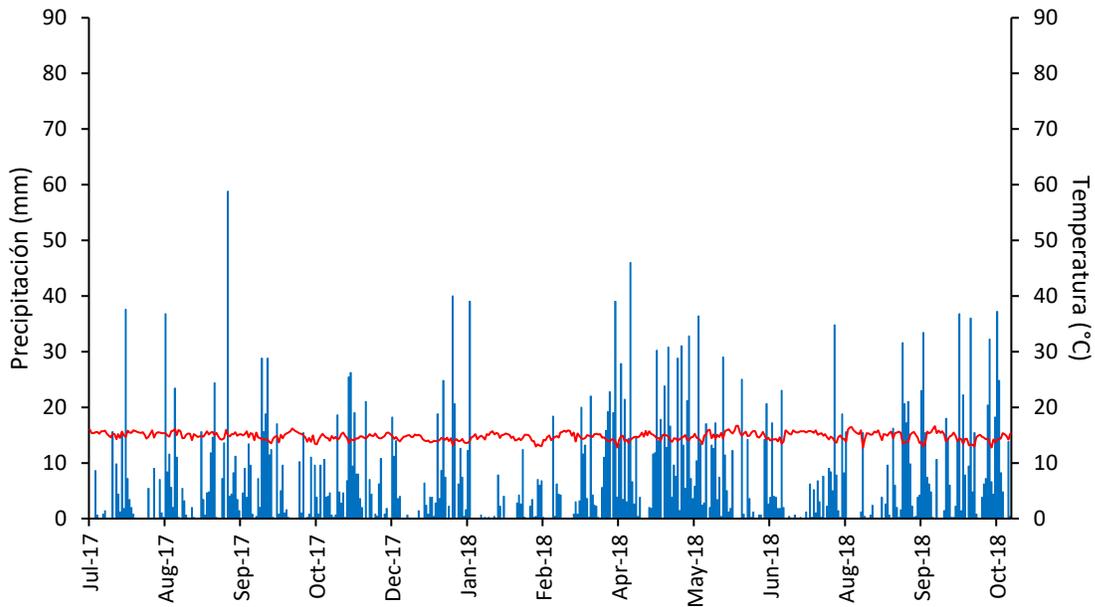


Figura 4.4: Climograma promedio anual en días en la Cuenca Pastos.

- **Radiación solar**

La radiación solar promedio de la cuenca El Silencio se presenta en la figura 4.5. Los picos más altos se encontraron en los meses de julio, agosto y septiembre 2017 con 194, 196 y 183 ($W m^{-2}$) respectivamente y en agosto 2018 fue de 169 ($W m^{-2}$); lo que se relaciona con los meses con mayores temperaturas identificadas en la figura 4.2.

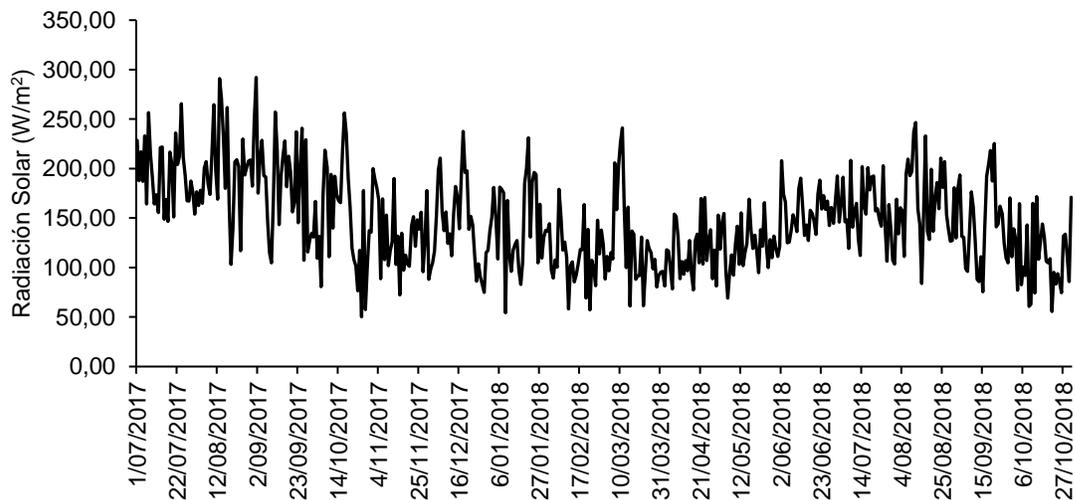


Figura 4.5: Radiación solar en la cuenca El Silencio, valores promedios mensuales.

En la figura 4.6 se presenta la radiación solar promedio durante el periodo de estudio en la cuenca Montañita. En los meses de agosto y septiembre 2017 se evidenciaron los picos más altos con 181 y 179 ($W m^{-2}$); en el 2018 en los meses de enero, junio, julio y agosto con 168, 173, 178 y 196 ($W m^{-2}$) respectivamente; lo que se relaciona con los meses con mayores temperaturas identificadas en la figura 4.3.

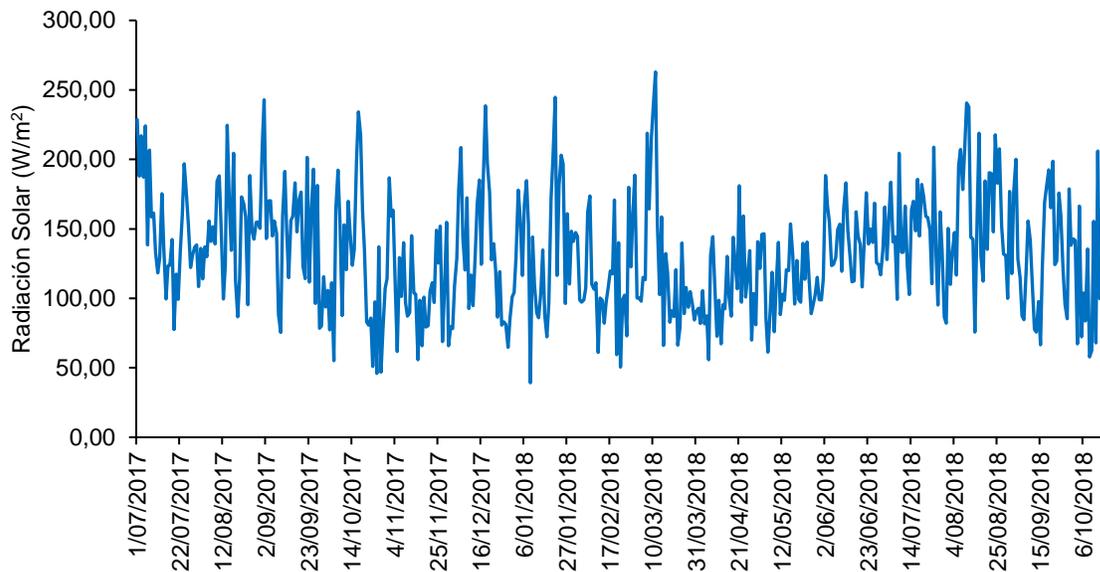


Figura 4.6: Radiación solar en la cuenca Montañita, valores promedios mensuales.

En la cuenca pastos, la radiación solar promedio está representada en la figura 4.7. Los picos más altos se encontraron en los meses de julio, agosto y septiembre 2017 con 216, 220 y 205 ($W m^{-2}$) respectivamente; y en los meses de junio, julio, agosto y septiembre 2018 con 204, 201, 212 y 189 ($W m^{-2}$); lo que se relaciona con los meses con mayores temperaturas identificadas en la figura 4.4. Un aspecto para resaltar es que los valores de radiación en la cuenca Pastos son mayores que en las otras dos cuencas.

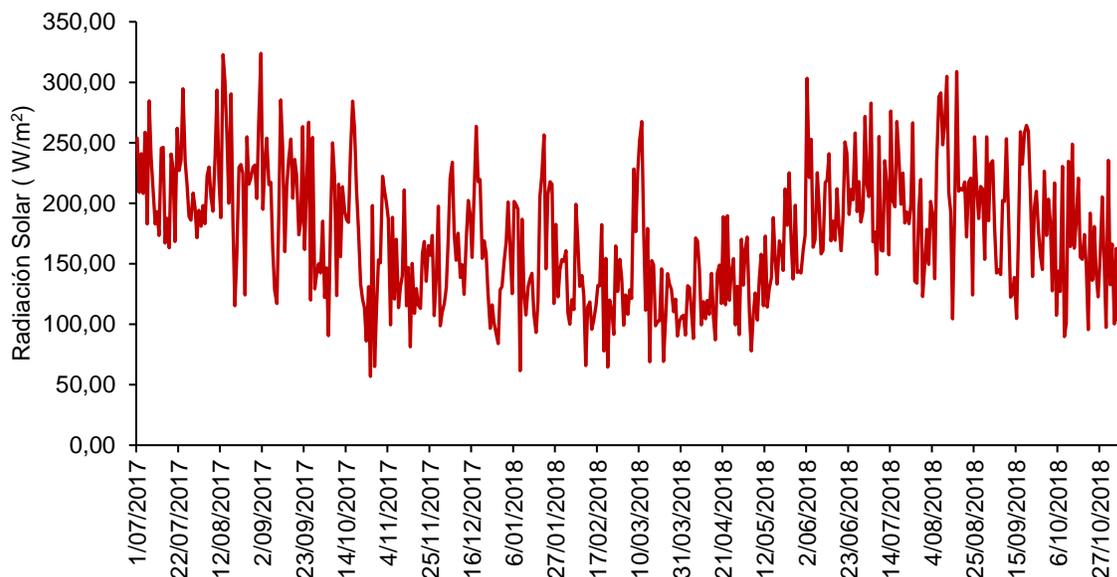


Figura 4.7: Radiación solar en la cuenca Pastos, valores promedios mensuales.

- **Humedad relativa**

La humedad relativa para los meses de estudio se muestra en la figura 4.8, en la cuenca El Silencio todos los datos estuvieron por encima del 80 %, siendo mayor que 93 % en noviembre 2017, en abril, mayo y octubre 2018 donde las lluvias son mayores. Los valores más bajos, menores al 87 %, correspondieron a los periodos donde no hubo precipitación, julio de 2017, julio y agosto de 2018. Por su parte, en la cuenca Montañita el mayor valor se presentó en noviembre de 2017 con 85,1 %, en abril, mayo y octubre de 2018 con 81,3 %, 81,8 % y 82,2 % respectivamente. Lo que coincide con los meses donde las lluvias son mayores. Los valores más bajos, corresponden a los periodos donde no hubo precipitación, julio (68,3 %) y agosto (70,5 %) de 2017, julio (69,8 %) y agosto (66,9 %) de 2018. En cuanto a la cuenca Pastos, la humedad relativa estuvo por encima del 78 % en todos los meses de estudio, teniendo el mayor valor en noviembre de 2017 con 90,4 %; en abril, mayo y octubre de 2018 presentó valores de 89,2 %, 88,5 % y 87,9 % respectivamente. Lo que coincide con los meses donde las lluvias son mayores. Los valores más bajos, correspondieron a los periodos donde no hubo precipitación, julio de 2017 (82,6 %), julio (81,5 %) y agosto (78,3 %) de 2018.

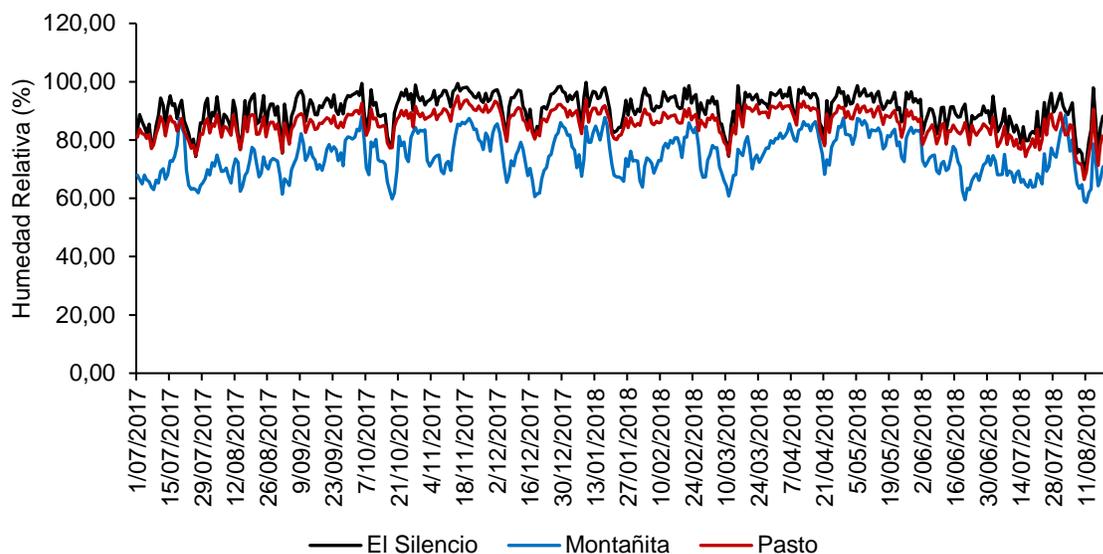


Figura 4.8: Valores promedios mensuales de humedad relativa en las cuencas hidrográficas monitoreadas.

- **Velocidad y dirección del viento.**

La rosa de los vientos suministra información en cuanto a la dirección del viento predominante y la velocidad más frecuente, para la cuenca El Silencio la dirección que predominó fue Oesnoroste (por sus siglas en inglés WNW) y le sigue la Sureste (SE). La velocidad más frecuente osciló entre 0 – 0,6 (m s^{-1}) (Figura 4.9).

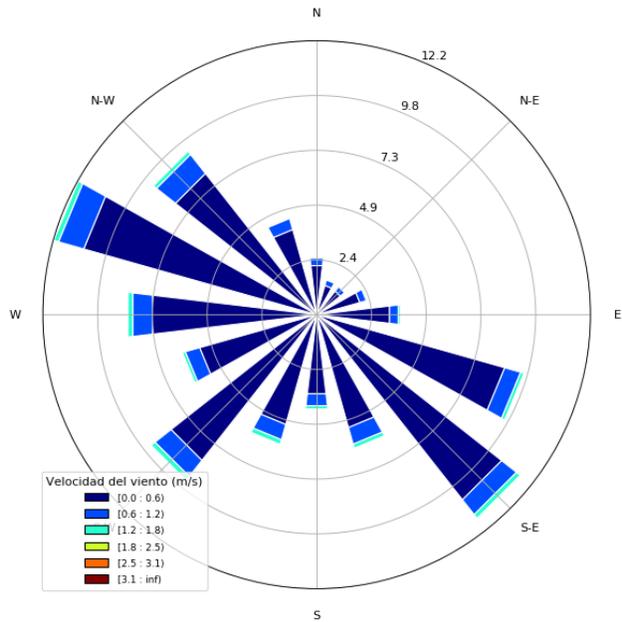


Figura 4.9: Rosa de los vientos en la cuenca El Silencio.

En la cuenca Montañita, la rosa de los vientos mostró que la dirección predominante fue Sur (S), seguida por la Sureste (SE). La velocidad más frecuente osciló entre 0 – 2 m/s. seguida por la 2 – 4 ($m\ s^{-1}$) (Figura 4.10).

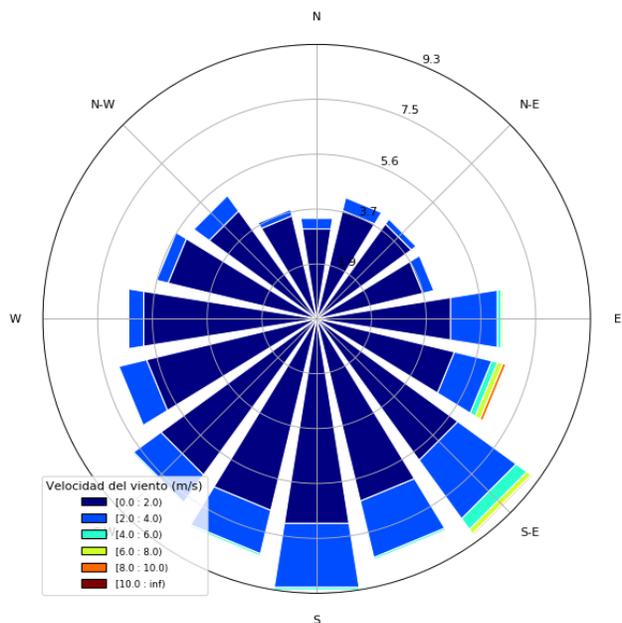


Figura 4.10: Rosa de los vientos en la cuenca Montañita.

Por su parte, la rosa de los vientos para la cuenca Pastos mostró que la dirección predominante fue Estenoreste (ENE), seguida por la Sur Sudoeste (SSW) y la velocidad más frecuente osciló entre 0 – 1,3 m/s, seguida por la 1,3 – 2,7 (m s⁻¹) (Figura 4.11).

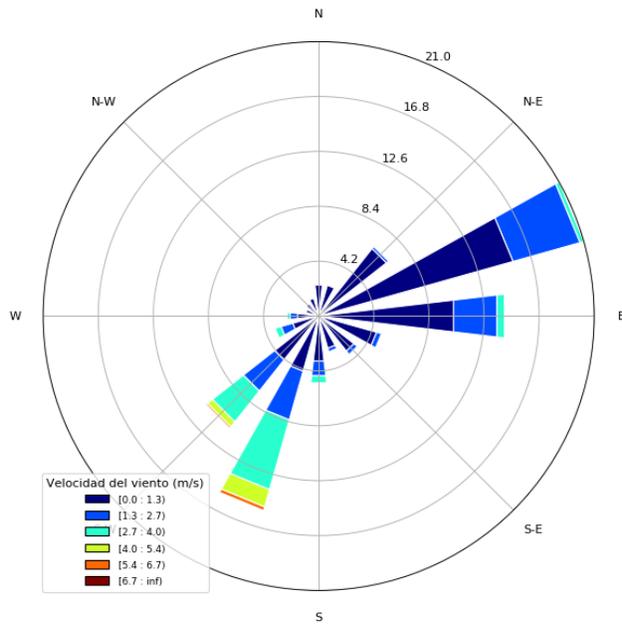


Figura 4.11: Rosa de los vientos en la cuenca Pastos.

4.3 Propiedades físicas del suelo.

4.3.1 Caracterización del perfil del suelo.

La descripción de las características del perfil del suelo de cada uno de los sitios de estudio se presenta en la tabla 4.2. Adicionalmente, las cuencas El Silencio y Montañita presentan una pequeña área con cobertura de bosque natural (Figuras 3.8 y 3.9) en la cual se presentan los siguientes horizontes:

Horizonte O: Estrato superficial con detritos orgánicos, hojas y materia orgánica parcialmente descompuesta.

Horizonte A: Capa superficial con presencia de materia orgánica parcialmente descompuesta, raíces, organismos y minerales. Estructura con bloques subangulares y color 10YR 2/1.

Horizonte A/B: Capa de transición con bajo contenido de materia orgánica y minerales.

Horizonte B: Capa mineral con gran porcentaje presencia arcilla y menor proporción de arenas y limos, con altos contenido de óxidos de hierro y aluminio, y compuestos húmicos.

Horizonte C: Capa con material parental parcialmente meteorizado, sobre el estrato rocoso.

Por otra parte, los sitios de la cuenca Pastos presentaron estos mismos horizontes a excepción del O y A; este último fue modificado por la mecanización agrícola y se denomina Ap (Horizonte arado).

Tabla 4.2: Caracterización de los perfiles de los suelos de las zonas de estudio *in situ*.

Sitios	Horiz.	Prof.	Color	Estructura	Raíces	Foto
El Silencio	O	5				
	A	22	10YR 2/1	Bloques subangulares medios	Abundantes finas, pocas medias y pocas gruesas	
	A/B	37				
	B	51	10YR 4/4	Bloques subangulares medios	Pocas finas y medias	
	C	51+	10YR 4/3	Bloques subangulares fuertes	N.P	
Montañita	O	4				
	A	26	10YR 2/1	Bloques subangulares medios	Abundantes finas y medias, algunas gruesas	
	A/B	30				
	B	40	10YR 4/3	Bloques subangulares medios	Pocas finas, medias y gruesas	
	C	40+	10YR 4/4	Bloques subangulares fuertes	Pocas medias	
Pastos	Ap	22	10YR 2/1	Bloques subangulares medios	Algunas finas, medias y gruesas	
	A/B	36				
	B	37	7.5YR 5/6	Granular	Algunas finas y gruesas	
	C	38+	7.5YR 5/8 (suelo) 5YR 5/6 (roca)	Bloques subangulares débiles con fragmentos de roca	N.P	
Bosque Natural	O	20			Abundantes finas, medias y gruesas	
	A	25	10YR 2/1	Bloques subangulares medios	Abundantes finas y medias	
	A/B	32				
	B	60	10YR 3/4	Bloques subangulares fuertes	Pocas finas	
	C	60+	7.5YR 5/6	Bloques subangulares medios	N.P	

4.3.2 Textura.

La distribución de partículas que presentan los horizontes del suelo en cada uno de los sitios de estudio se presenta en la tabla 4.3. En términos generales, los sitios de estudio poseen suelos de textura fina de acuerdo con lo reportado por (FAO, 2020).

Tabla 4.3: Media para la Textura en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados (n = 48)

Parámetros	Sitios de estudio.											
	El Silencio			Montañita			Pastos			Bosque Natural		
	Horizontes del perfil del suelo.											
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Arena (%)	3	55	22	4	3	30	20	28	25	53	9	52
Limo (%)	45	25	40	44	44	40	50	32	35	27	40	28
Arcilla (%)	52	20	38	52	53	30	30	40	40	20	51	20
Clase textural	ArL	FA	FAr	ArL	ArL	FAr	FL	FAr	FAr	FA	ArL	FA

*ArL: Arcillo Limoso; FA: Franco Arenoso; FAr: Franco Arcilloso; FL: Franco Limoso

4.3.3 Densidad aparente (Da).

Los valores promedio de densidad aparente (Da) determinados para cada horizonte en los diferentes sitios de estudio se presentan en la tabla 4.4. En términos generales, se aprecia un incremento de la Da con respecto a la profundidad del suelo. En el horizonte A, los sitios en restauración El Silencio y Montañita presentaron los menores valores de Da con 0,54 y 0,55 (g cm^{-3}) respectivamente; seguidos del sitio de Bosque natural (Bos) con 0,58 (g cm^{-3}); mientras que el sitio de Pastos mostró el valor más alto con 0,74 (g cm^{-3}). Los sitios en restauración mostraron un incremento en el horizonte B del 3 y 9 % en relación con el horizonte A, mientras que, para el sitio de Bosque, el incremento fue del 26 % y para Pastos del 42 %. En el horizonte C, los sitios El Silencio y Montañita registraron los valores más bajos con 0,66 y 0,59 (g cm^{-3}) respectivamente. Por su parte, el sitio de Bosque Natural registró un valor de 0,88 (g cm^{-3}) mucho menor que el de Pastos, quien presentó un valor de 1,18 (g cm^{-3}).

Tabla 4.4: Media para la densidad aparente (g cm^{-3}) en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados ($n = 48$)

Horizonte	Sitios de estudio			
	Bosque Natural	El Silencio	Montañita	Pastos
A	0,58 de	0,54 e	0,55 e	0,74 cd
B	0,73 cd	0,59 de	0,57 de	1,05 ab
C	0,88 bc	0,66 de	0,59 de	1,18 a
Valor p	0,00546 **	0,0525	0,0476 *	88e-05 ***

* ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$), *** ($p < 0,001$), a, b, c medias con letras diferentes dentro de una misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

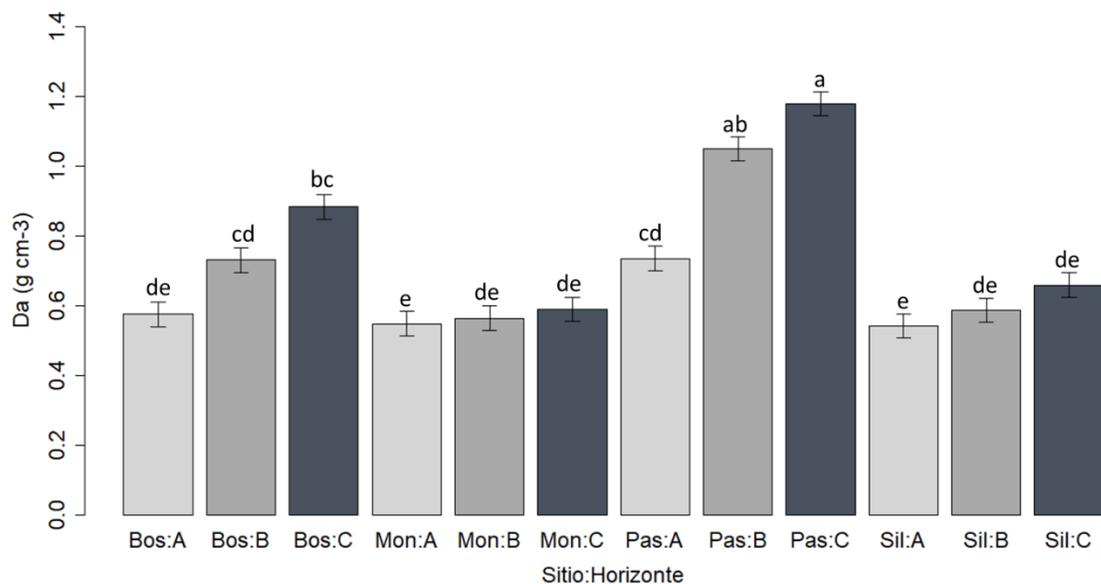


Figura 4.12: Diagrama de barras y bigotes para Densidad Aparente (D_a) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas).

4.3.4 Porosidad (α).

Los valores de porosidad (P_o) determinados para cada uno de los horizontes del suelo presentes en los diferentes sitios de estudio se muestran en la tabla 4.5. En relación con el horizonte A, los sitios El Silencio y Montañita presentaron la mayor P_o con valores de 79,51 y 79,26 (%) respectivamente; mientras que en los sitios Bosque y Pastos se determinó una P_o entre el 74,7 y 72 (%). En referencia al horizonte B, el sitio de Montañita se destacó con una P_o de 78,68 %, seguido del El Silencio con 77,81 %, Bosque natural con 72,4 % y por último Pastos con 60,34 %. En cuanto al horizonte C, el sitio de Montañita presentó una disminución del 1,21 % con respecto al horizonte antecesor; por su parte los sitios de Bosque natural y El Silencio exhibieron una P_o de 66,64 y 75,12 (%) respectivamente; mientras que el sitio de Pasto obtuvo el menor valor con un 55,48 %.

Tabla 4.5: Media para la porosidad (%) en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados (n = 48)

Horizonte	Sitios de estudio			
	Bosque Natural	Silencio	Montañita	Pastos
A	74,62a	79,51a	79,26 a	72,22 ab
B	72,4 ab	77,81a	78,68 a	60,34 cd
C	66,64 b	75,12a	77,73 a	55,48 d
Valor p	0,0859 ^C	0,0525	0,0476 *	88e-05 ***

* ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$), *** ($p < 0,001$), a, b, c medias con letras diferentes dentro de una misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

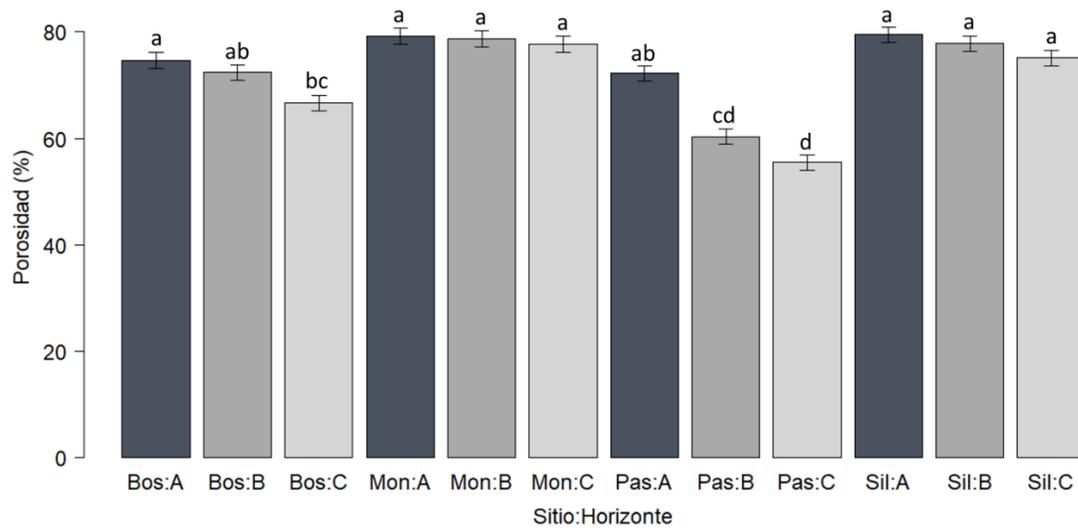


Figura 4.13: Diagrama de barras y bigotes para porosidad (%) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas).

4.4 Propiedades hidráulicas del suelo.

4.4.1 Infiltración.

El análisis estadístico para la infiltración mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las cuencas hidrográficas de estudio (Tabla 4.6). La cuenca montañita presentó la mayor capacidad de infiltración instantánea $19,20 \text{ (cm h}^{-1}\text{)}$, seguida de El Silencio con $12,60 \text{ (cm h}^{-1}\text{)}$ y por último Pastos con $7,80 \text{ (cm h}^{-1}\text{)}$

Por otra parte, en la figura 4.14 se presentan las curvas de infiltración instantánea ajustadas por regresión lineal para cada cuenca mediante la aplicación del modelo potencial $Y=aX^{-b}$. Las cuencas El Silencio y Montañita presentan gran similitud en las fases transitorias (≤ 40 minutos) y estacionarias (≥ 40 minutos); sin embargo, la tasa de infiltración instantánea de la cuenca Montañita es mayor que la del El Silencio. Por su parte, la tasa de infiltración para la cuenca Pastos es considerablemente baja en las fases transitorias (≤ 20 minutos) y estacionarias (≤ 80 minutos). Esto evidencia una condición de mayor restricción para el ingreso del agua en los diferentes suelos de la cuenca.

Tabla 4.6: Media, rango, desviación estándar y coeficiente de variación para la infiltración ($n = 36$)

Estadístico	Sitios de estudio		
	El Silencio	Montañita	Pastos
Media (cm h^{-1})	12,6 ab	19,2 a	7,8 b
Rango (cm h^{-1})	13,2 – 12,0	20,4 – 18,0	9,6 – 6,0
DS	0,85	1,7	2,55
CV (%)	0,07	0,09	0,33

* ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$), *** ($p < 0,001$), a, b, c medias con letras diferentes dentro de una misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

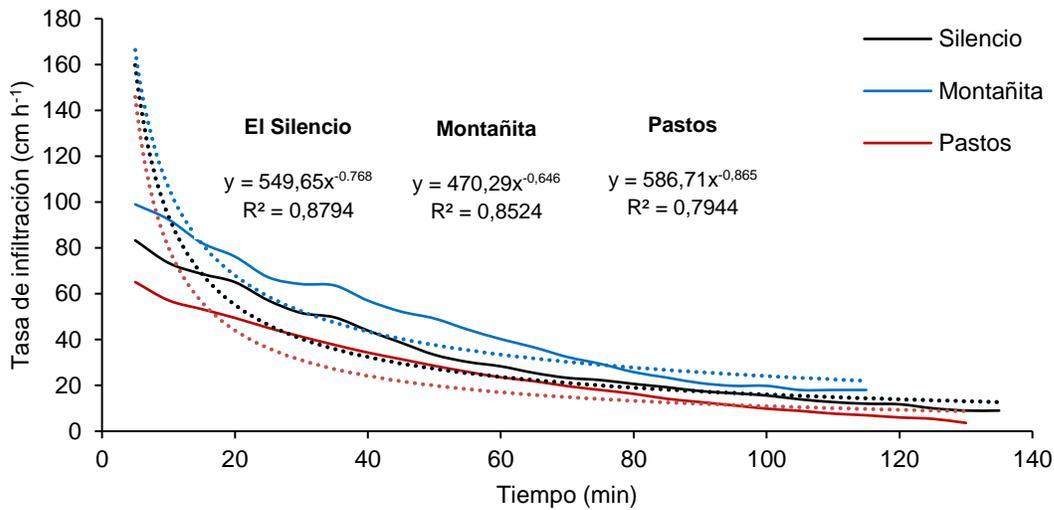


Figura 4.14: Curvas de infiltración ajustadas por regresión lineal al modelo de potencia ($Y=aX^{-b}$) para las cuencas hidrográficas monitoreadas.

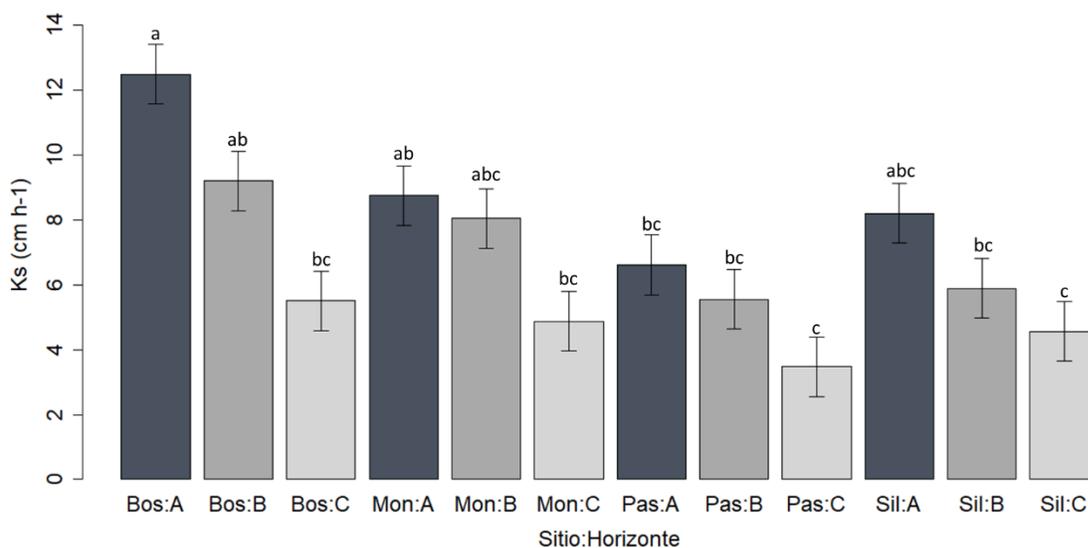
4.4.2 Conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s).

Los valores promedios de conductividad hidráulica saturada (K_s) determinados para los horizontes de suelo en cada uno de los sitios de estudio se muestran en la tabla 4.7. El sitio de Bosque natural presentó en el horizonte A el mayor valor con 12,48 (cm h⁻¹); mientras que los otros sitios de El Silencio y Montañita mostraron un comportamiento similar con valores menores de 8,20 y 8,74 (cm h⁻¹) respectivamente, y el sitio de Pastos mostró el menor valor con 6,61 (cm h⁻¹). En el horizonte B, la conductividad hidráulica disminuyó en el sitio de Bosque natural un 26,4 %, en El Silencio un 28,17 %, en Montañita un 8 % y en Pastos un 16,19 %. Para finalizar, en el horizonte C en todos los sitios se mostró una reducción en los valores de conductividad hidráulica con respecto al horizonte antecesor.

Tabla 4.7: Media para la conductividad hidráulica (cm h^{-1}) en los horizontes del suelo de los sitios monitoreados ($n = 48$)

Horizonte	Sitios de estudio			
	Bosque Natural	Silencio	Montañita	Pastos
A	12,48 a	8,2 abc	8,74 ab	6,61 bc
B	9,19 ab	5,89 bc	8,04 abc	5,54 bc
C	5,51 bc	4,56 c	4,87 bc	3,47 c
Valor p	0,0711	0,129	0,0767	0,0596

* ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$), *** ($p < 0,001$), a, b, c medias con letras diferentes dentro de una misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) / ee: error experimental, p: probabilidad de la muestra

**Figura 4.15:** Diagrama de barras y bigotes para conductividad hidráulica (K_s) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas)

4.4.3 Capacidad de retención de humedad.

Las constantes de humedad determinados a una presión de 33 kPa o capacidad de campo (CC) y 1500 kPa o punto de marchitez permanente (PMP) para cada uno de los horizontes del suelo en cada uno de los sitios de estudio se presenta en la tabla 4.8. En términos generales, se evidenció una reducción de las constantes de humedad a medida que aumenta la profundidad. En el horizonte A (Figura 4.13), las constantes de humedad a CC y PMP fueron relativamente semejantes entre los sitios de Bosque natural, El Silencio y Montañita. Sin embargo, El Silencio tiene la mayor capacidad de almacenamiento de agua. En lo que respecta al sitio de Pastos, este presentó las menores constantes de humedad a CC y PMP con 0,55 y 0,19 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) respectivamente, y por ende la menor capacidad de almacenamiento de agua. En cuanto a los horizontes B y C en todos los sitios muestreados no presentaron diferencias significativas.

Tabla 4.8: Valores promedios de la capacidad de retención de humedad del suelo (Contenido volumétrico) para cada sitio de estudio.

Horizonte A						
Sitios de estudio						
Parámetros ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	El Silencio	Montañita	Pastos	Bosque Natural	ee±	Valor p
CC (33 kPa)	0,68 ^a	0,64 ^a	0,55 ^b	0,65 ^a	0,021	0,013*
PMP (1500 kPa)	0,23 ^a	0,22 ^a	0,19 ^a	0,22 ^a	0,009	0,075
AD	0,45 ^a	0,42 ^a	0,36 ^a	0,43 ^a	0,026	0,083
Horizonte B						
Sitios de estudio						
Parámetros ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	El Silencio	Montañita	Pastos	Bosque Natural	ee±	Valor p
CC (33 kPa)	0,59 ^a	0,63 ^a	0,53 ^a	0,63 ^a	0,03	0,09
PMP (1500 kPa)	0,24 ^a	0,22 ^a	0,19 ^a	0,22 ^a	0,015	0,108
AD	0,35 ^a	0,41 ^a	0,34 ^a	0,41 ^a	0,028	0,13
Horizonte C						
Sitios de estudio						
Parámetros ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	El Silencio	Montañita	Pastos	Bosque Natural	ee±	Valor p
CC (33 kPa)	0,56 ^a	0,55 ^a	0,51 ^a	0,57 ^a	0,019	0,124
PMP (1500 kPa)	0,29 ^a	0,27 ^a	0,24 ^a	0,22 ^a	0,029	0,761
AD	0,27 ^a	0,28 ^a	0,27 ^a	0,35 ^a	0,028	0,845

* ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$), *** ($p < 0,001$), a, b, c medias con letras diferentes dentro de una misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) / CC: Capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; AD: agua disponible / ee: error experimental.

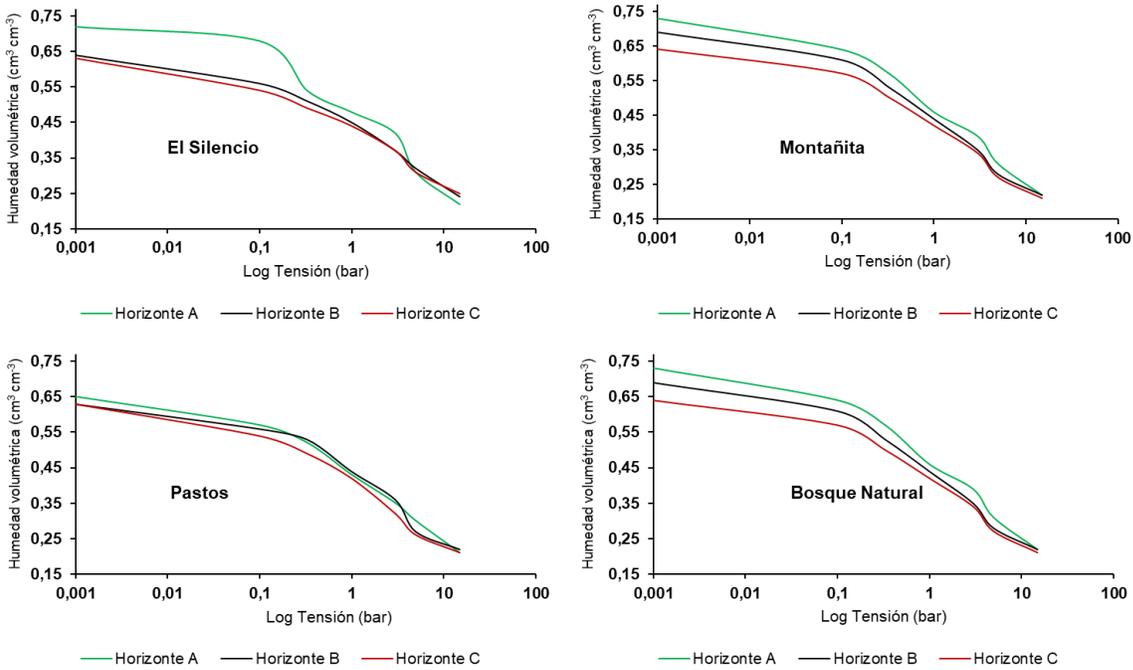


Figura 4.16: Curvas características de retención de humedad de los suelos en las cuencas de estudio.

4.5 Materia orgánica.

Los valores de materia orgánica determinados en el solum de suelo (horizontes A y B) en cada uno de los sitios de estudio se presentan en la tabla 4.9. En términos generales, en todos los sitios se evidencia una disminución del contenido de materia orgánica conforme aumenta la profundidad del suelo. El sitio de Bosque Natural presentó en el horizonte A el mayor contenido de materia orgánica (MO) con 26,63 %; mientras que los sitios El Silencio, Montañita y Pastos presentaron un contenido MO de 20,10; 20,40 y 18,07 % respectivamente. Por otra parte, en el horizonte B el mayor contenido de MO se presentó en el sitio Montañita con 10,63 %, seguido de Bosque natural con 10,40 %, posteriormente El Silencio con 9,9 % y por último Pastos con 6,03 %.

Tabla 4.9: Valores promedios de materia orgánica.

Horizonte	Sitios de estudio			
	Bosque Natural	Silencio	Montañita	Pastos
A	26,63 a	20,1 ab	20,4 ab	18,07 bc
B	10,4 cd	9,9 cd	10,63 cd	6,3 d
Valor p	0,0142 *	0,00159 **	4,99e-05 ***	0,00976 **

* ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$), *** ($p < 0,001$), a, b, c medias con letras diferentes dentro de una misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) / ee: error experimental, p: probabilidad de la muestra

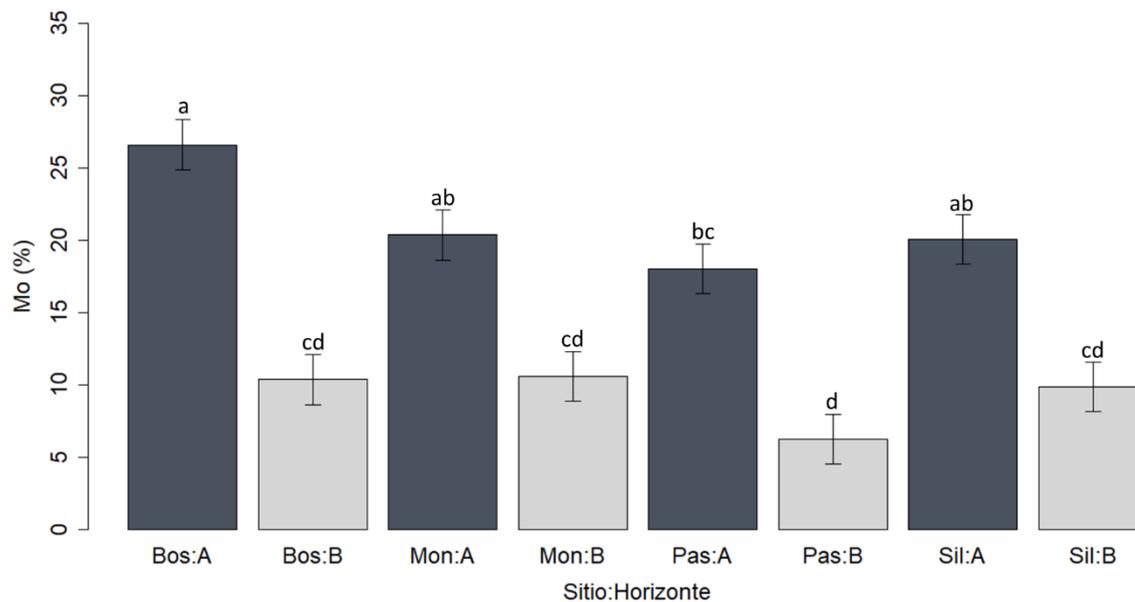


Figura 4.17: Diagrama de barras y bigotes para materia orgánica (%) en los suelos de los sitios de monitoreo Bosque natural (Bos), El Silencio (Sil), Montañita (Mon) y Pastos (Pas)

4.6 Resultado de las mediciones ecohidrológicas.

4.6.1 Humedad del suelo.

4.6.1.1 Cuenca El Silencio.

En las figuras 4.18 y 4.19 se presenta el comportamiento temporal y espacial del contenido de humedad de los suelos, en los respectivos horizontes diagnósticos (A, A/B, B y C) en dos sitios en la cuenca El Silencio, durante el periodo del 01/07/2017 hasta el 31/08/2018. En ambas figuras se aprecia que el contenido de humedad en cada uno de los horizontes oscila en el rango del agua disponible en el suelo (AD) para las plantas, que corresponde al límite de la línea roja del punto de marchitez permanente (PMP) y la línea negra de capacidad de campo (CC). El contenido de humedad tiende a aumentar en los periodos de altas precipitaciones (01/09/2017 hasta 30/11/2017 y 01/03/2018 hasta 31/05/2018), a su vez disminuye progresivamente en los periodos de bajas precipitaciones (01/07/2017 hasta 31/08/2017; 01/12/2017 hasta 28/02/2018 y 01/06/2018 hasta 31/08/2018). Por otra parte, se aprecia que en la figura 4.18 el comportamiento de la humedad en los horizontes A, transición A/B y C no presentó diferencias entre sí; pero comparándolos con el horizonte B si se presentaron diferencias. En la figura 4.19, se observa que no se presentó un comportamiento diferencial en el contenido de humedad entre los horizontes A y transición A/B, al igual que entre los horizontes B y C; pero si se aprecia diferencias entre las parejas de horizontes mencionadas. En relación con el periodo de bajas precipitaciones (01/07/2017 hasta 31/08/2017), el contenido de humedad en cada uno de los horizontes monitoreados fue mayor en el sitio 2 con respecto al sitio 1.

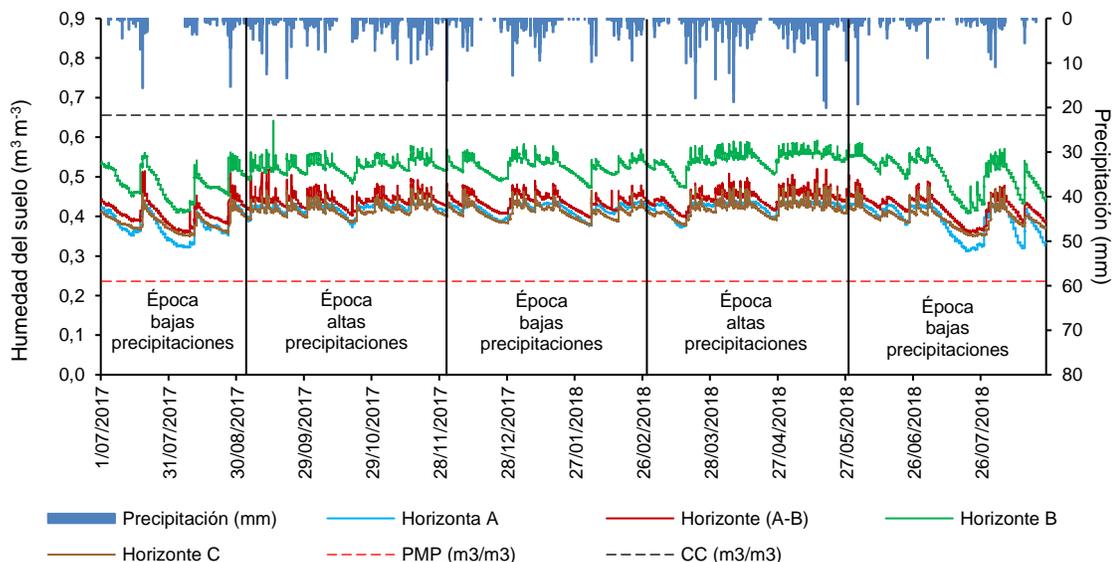


Figura 4.18: Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en el sitio 1 de la cuenca El Silencio para el periodo de estudio (01/07/2017 – 31/08/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 18 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 27 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 48 cm.

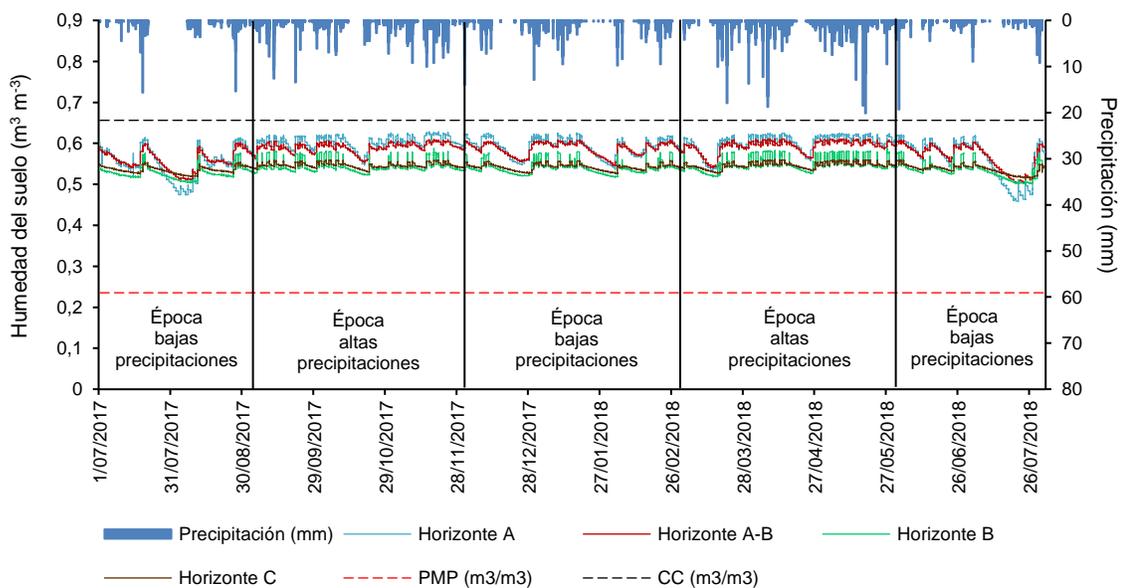


Figura 4.19: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 2 de la cuenca El Silencio para el periodo de estudio (01/07/2017 – 31/08/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 9 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 14 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 34 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 52 cm.

4.6.1.2 Cuenca Montañita.

Las figuras 4.20 y 4.21, exponen el comportamiento del contenido de humedad en los horizontes A, transición A/B, B y C de dos sitios en la cuenca Montañita; durante el periodo del 01/07/2017 hasta el 31/08/2018. En la figura 4-20, se aprecia que el contenido de humedad en los horizontes monitoreados osciló en el rango del agua disponible (AD) para las plantas. Por otra parte, el contenido de humedad en cada uno de los horizontes aumentó en los periodos de altas precipitaciones (01/09/2017 hasta el 30/11/2017 y 01/03/2018 hasta el 31/05/2018) y a su vez disminuyó en los periodos de bajas precipitaciones (01/07/2017 hasta el 31/08/2017; 01/12/2017 hasta el 28/02/2018 y 01/06/2018 hasta el 31/08/2018). Adicionalmente, en los horizontes A y transición A/B no muestran un comportamiento diferente entre sí, sin embargo, a partir de marzo de 2018 empieza a tener un comportamiento diferente entre sí. En los horizontes B y C si se evidencia un comportamiento diferente entre sí. Por su parte, en la figura 4.21 se observa que, durante todo el transcurso de la investigación, los horizontes A, B y C oscilaron en el rango del agua disponible (AD) para las plantas y el horizonte de transición A/B alcanzó algunos picos de saturación en los periodos de altas precipitaciones (01/09/2017 hasta el 30/11/2017 y 01/03/2018 hasta el 31/05/2018). También se puede apreciar que los horizontes A y B no muestran un patrón de comportamiento diferente entre sí, pero comparándolos con los horizontes transición A/B y C se aprecian comportamientos diferentes entre sí. En relación con el periodo de bajas precipitaciones (01/12/2017 hasta 28/02/2018), el contenido de humedad en cada uno de los horizontes monitoreados fue mayor en el sitio 2 con respecto al sitio 1.

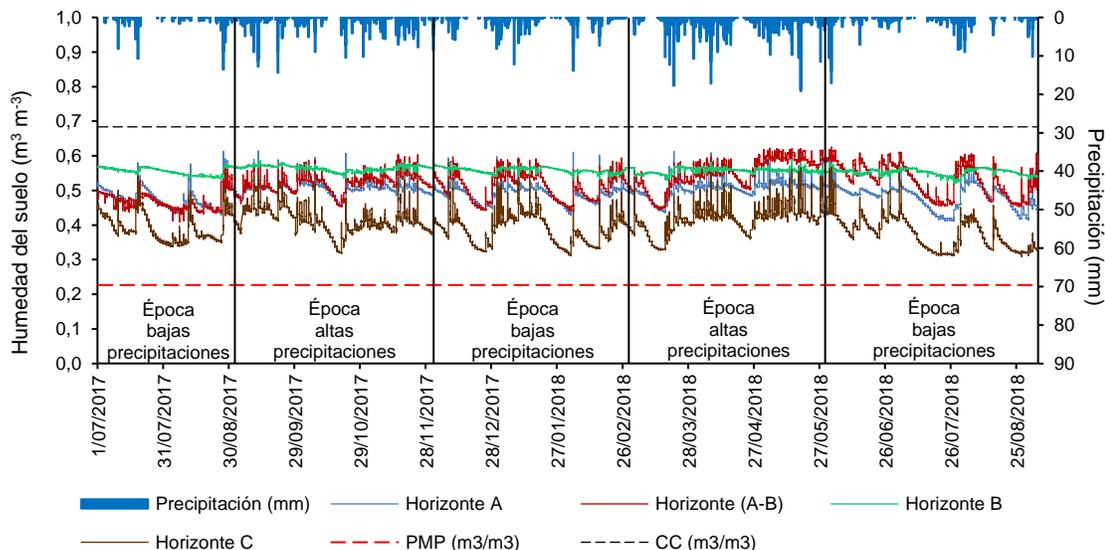


Figura 4.20: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 1 de la cuenca Montañita para el periodo de estudio (7/1/2017 – 9/3/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 15 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 35 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 65 cm.

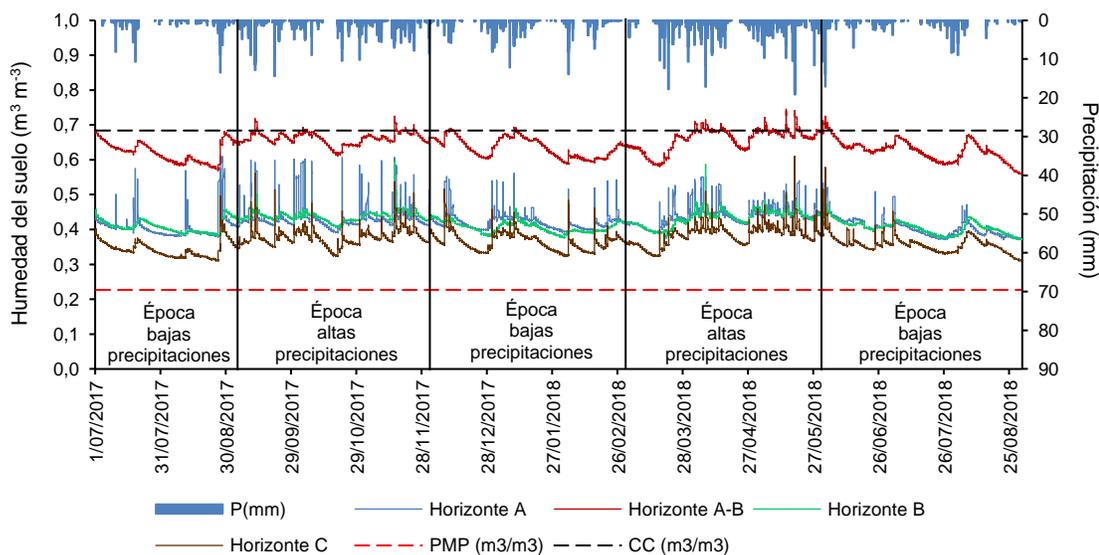


Figura 4.21: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 2 de la cuenca Montañita para el periodo de estudio (7/1/2017 – 8/30/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 6 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 18 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 30 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 56 cm.

4.6.1.3 Cuenca Pastos.

Las figuras 4.22 y 4.23, presentan el comportamiento del contenido de humedad en los horizontes A, transición A/B, B y C de dos sitios diferentes de la cuenca Pastos; durante el periodo del 01/07/2017 hasta el 31/08/2018. Por otro lado, se aprecia que en ambas figuras el contenido de humedad en los horizontes monitoreados oscila en el rango del agua disponible (AD) para las plantas. Igualmente, el contenido de humedad en cada uno de los horizontes aumentó en los periodos de altas precipitaciones (01/09/2017 hasta el 30/11/2017 y 01/03/2018 hasta el 31/05/2018) y a su vez disminuyó en los periodos de bajas precipitaciones (01/07/2017 hasta el 31/08/2017; 01/12/2017 hasta el 28/02/2018 y 01/06/2018 hasta el 31/08/2018). En la figura 4.22, se observa que los horizontes presentaron patrones de comportamiento diferentes entre sí. Por su parte, en la figura 4.23 se evidencia que los horizontes no presentan un patrón de comportamiento diferente entre sí. En relación con el periodo de altas precipitaciones (01/03/2018 hasta 31/05/2018), el contenido de humedad en los horizontes A y C fue mayor en el sitio 1 con respecto al sitio 2; mientras que el contenido de humedad en el horizonte B fue mayor en el sitio 2 con relación al sitio 1.

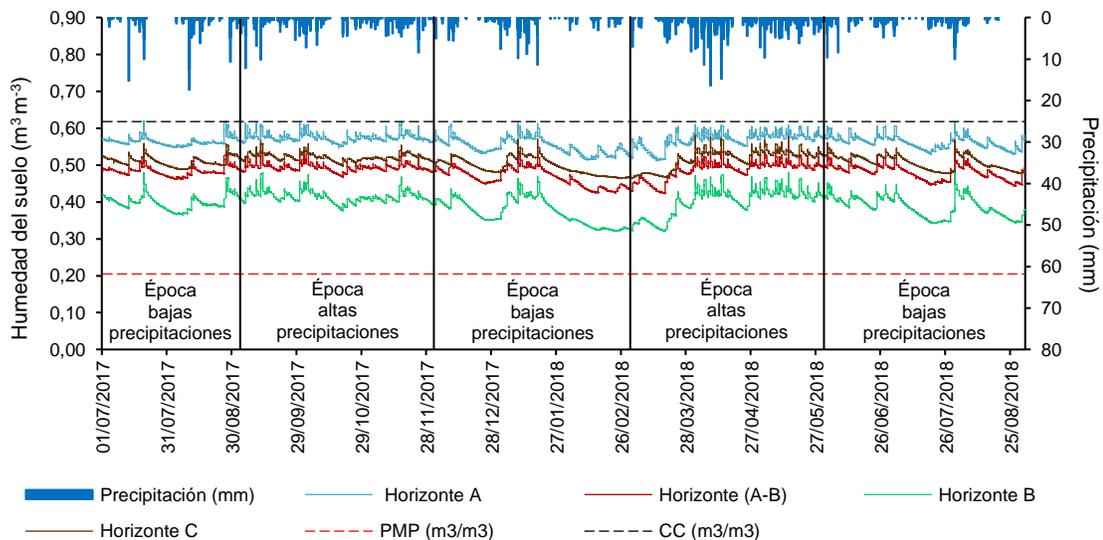


Figura 4.22: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 1 de la cuenca Pastos para el periodo de estudio (7/1/2017 – 8/31/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte A-B: sensor 2 ubicado a 22 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 43 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 78 cm.

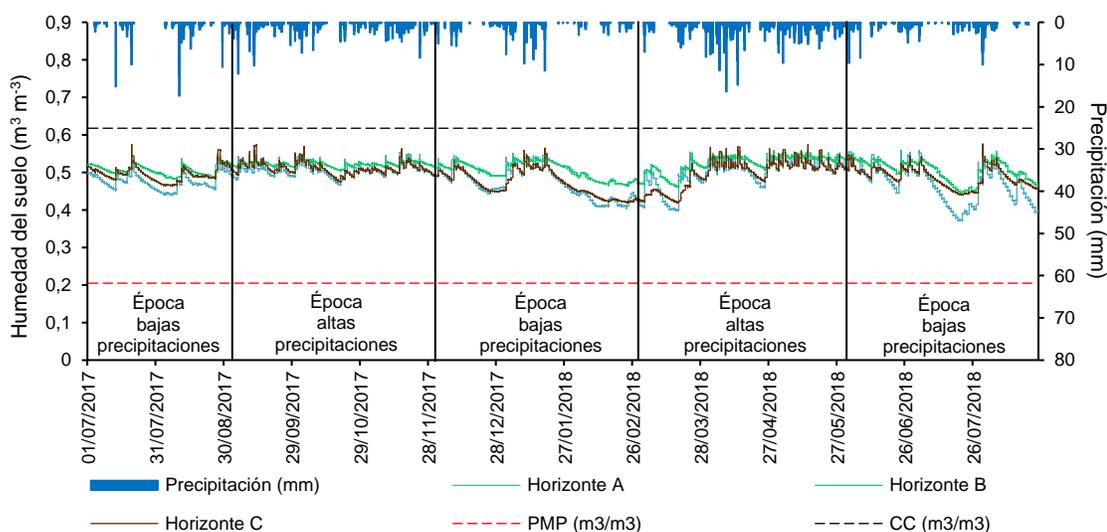


Figura 4.23: Dinámica espaciotemporal de la humedad del suelo en el sitio 2 de la cuenca Pastos para el periodo de estudio (7/1/2017 – 8/23/2018). Horizonte A: sensor 1 ubicado a 5 cm. Horizonte B: sensor 3 ubicado a 22 cm. Horizonte C: sensor 4 ubicado a 50 cm.

4.6.2 Evapotranspiración.

En general, las tasas de evapotranspiración real o actual (ETa) en las cuencas El Silencio y Montañita en las épocas de altas y bajas precipitaciones fueron muy similares; oscilaron en un rango de 1,9 y 3,1 (mm d^{-1}). En relación con la cuenca de Pastos, está en la época de altas y bajas precipitaciones presentó mayores tasas de evapotranspiración que fluctuaron entre 2 y 3,2 (mm d^{-1}).

Tabla 4.10: Valores promedio anuales de las variables de entrada en el modelo de evapotranspiración de Penman-Monteith (ETo), a partir de la cuales se determinó ETa, con datos cada 30 minutos.

Estación	Temp. Med ($^{\circ}\text{C}$)	HR (%)	Vel. Vin (m s^{-1})	Rad.Sol (W m^{-2})	ETa (mm d^{-1})
El Silencio	16,16	90,66	0,25	146,87	3,11
Montañita	15,09	74,80	1,12	130,98	3,04
Pastos	14,81	85,67	0,64	174,53	2,49

Temp. Med.: temperatura promedio. HR: humedad relativa. Vel. Vin: velocidad del viento. Rad. Sol: radiación solar.

4.6.2.1 Caudal total (Q_t), Caudal base (Q_b) y Caudal rápido (Q_r).

En la tabla 4.11 se presentan los valores promedio anual de la precipitación y el caudal total, base y de tormenta de las cuencas hidrográficas monitoreadas en esta investigación. La precipitación anual fue mayor en la cuenca Montañita con 2994,5 mm; esto influyó en la respuesta a largo plazo del caudal base logrando destacarse con 1496,5 mm por encima de las otras cuencas. Por su parte, la cuenca El Silencio sobresalió en caudal total y de tormenta con 1631 y 231 mm respectivamente.

Tabla 4.11: Valores promedio anual de la precipitación (P), caudal total (Q_t), Caudal base (Q_b) y Caudal de tormenta o rápido (Q_r) de las cuencas hidrográficas monitoreadas.

Estación	P (mm y ⁻¹)	Q_t (mm y ⁻¹)	Q_b (mm y ⁻¹)	Q_r (mm y ⁻¹)
El Silencio	2855,6	1630,2 (57,1 %)	1400,3 (85,9 %)	229,9 (14,1 %)
Montañita	2994,5	1626,1 (54,3 %)	1496,4 (92 %)	129,7 (8 %)
Pastos	2384,8	1518,1 (63,7 %)	1320,3 (87 %)	197,8 (13 %)

4.6.2.2 Cuenca El Silencio

La respuesta de la cuenca El Silencio a los eventos de lluvia en la época de bajas precipitaciones se presenta en la tabla 4.12, en términos generales durante esta época los eventos registraron una precipitación promedio diaria de 9,04 (mm), con una duración de 1,33 (h) e intensidad de 10,44 (mm h⁻¹); lo que produjo respuestas en los caudales total (3,87 mm), base (3,37 mm) y de tormenta (0,5 mm); con tiempos de crecida (1,09 h), descenso (4,39 h) y agotamiento (9,9 h). El coeficiente de escorrentía por evento fue de 5,64.

Tabla 4.12: Valores promedios y desviación estándar, máximos, mínimos y coeficiente de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de bajas precipitaciones en la cuenca El Silencio (n=11).

	P (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)	Qt (mm)	Qb (mm)	Qr (mm)	Tc (h)	Td (h)	Ta (h)	Cee
Promedio	9,04	1,33	10,44	3,87	3,37	0,5	1,09	4,39	9,9	5,64
SD	5,04	0,83	10,6	1,88	1,78	0,37	0,57	1,76	4,83	2,78
Mín	2,8	0,25	3,08	1,36	1,25	0,11	0,33	2,17	2,83	1,51
Máx	19,88	2,75	40,32	7,11	6,77	1,21	2,33	7,08	17,08	10,82
CV (%)	0,56	0,63	1,02	0,48	0,53	0,73	0,52	0,4	0,49	49,34

P: Precipitación, D: Duración, I: Intensidad, Qt: Caudal total por evento, Qb: Caudal base por evento, Qr: Caudal de tormenta o rápido por evento, Tc: Tiempo de crecida, Td: Tiempo de descenso, Ta: Tiempo de agotamiento. Cee: Coeficiente de escorrentía por evento.

Por otra parte, en la tabla 4.13 se presenta la respuesta de la cuenca El Silencio a los eventos de lluvia en la época de altas precipitaciones. La precipitación promedio diaria registrada fue de 32,53 (mm), con una duración de 3,40 (h) e intensidad de 10,72 (mm h⁻¹); lo que originó respuesta en los caudales total (7,05 mm), base (4,18 mm) y de tormenta (2,87 mm); con tiempos de crecida (1,43 h), descenso (5,83 h) y agotamiento (11,49 h). El coeficiente de escorrentía por evento fue de 8,24.

Tabla 4.13: Valores promedios y desviación estándar, máximos, mínimos y coeficiente de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de altas precipitaciones en la cuenca El Silencio (n=10)

	P (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)	Qt (mm)	Qb (mm)	Qr (mm)	Tc (h)	Td (h)	Ta (h)	Cee
Promedio	32,53	3,48	10,72	7,05	4,18	2,87	1,43	5,83	11,49	8,24
SD	9,96	2,03	10,84	2,02	1,51	1,24	1,42	1,92	5,44	2,82
Min	20,16	0,92	0,52	3,04	1,91	0,78	0,5	2,08	6,25	3,09
Max	49,28	6,67	38,18	16,46	7,46	9	4,92	7,75	21,33	21,48
CV (%)	0,31	0,58	1,01	0,29	0,36	0,43	0,99	0,33	0,47	34,25

P: Precipitación, D: Duración, I: Intensidad, Qt: Caudal total por evento, Qb: Caudal base por evento, Qr: Caudal de tormenta o rápido por evento, Tc: Tiempo de crecida, Td: Tiempo de descenso, Ta: Tiempo de agotamiento. Cee: Coeficiente de escorrentía por evento.

4.6.2.3 Cuenca Montañita.

En las épocas de bajas precipitaciones durante el periodo de investigación, la respuesta de la cuenca Montañita a los eventos de lluvia se presenta en la tabla 4.14, en resumen, la precipitación promedio diaria registrada fue de 7,66 (mm), con una duración de 2,44 (h) e intensidad de 4,65 (mm h⁻¹); lo que originó respuesta en los caudales total (2,66 mm),

base (2,39 mm) y de tormenta (0,27 mm); con tiempos de crecida (1,53 h), descenso (5,19 h) y agotamiento (7,62 h). El coeficiente de escorrentía por evento fue de 3,66.

Tabla 4.14: Valores promedios y su desviación estándar, máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de bajas precipitaciones en la cuenca Montañita (n=10)

	P (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)	Qt (mm)	Qb (mm)	Qr (mm)	Tc (h)	Td (h)	Ta (h)	Cee
Promedio	7,66	2,44	4,65	2,66	2,39	0,27	1,53	5,19	7,62	3,66
SD	1,53	1,36	3,49	1,06	1,01	0,09	0,61	3,24	4,20	1,33
Min	5,98	0,58	1,46	1,37	1,24	0,13	0,75	2,33	3,42	1,90
Max	11,35	4,83	11,39	4,60	4,20	0,43	2,58	11,08	15,33	6,02
CV (%)	20,00	55,78	74,92	39,80	42,40	33,41	40,24	62,40	55,15	36,39

P: Precipitación, D: Duración, I: Intensidad, Qt: Caudal total por evento, Qb: Caudal base por evento, Qr: Caudal de tormenta o rápido por evento, Tc: Tiempo de crecida, Td: Tiempo de descenso, Ta: Tiempo de agotamiento. Cee: Coeficiente de escorrentía por evento.

Por su parte, la respuesta de la cuenca Montañita a los eventos de lluvia en la época de altas precipitaciones se enseña en la tabla 4.15; la precipitación promedio diaria registrada fue de 36,77 (mm), con una duración de 3,41 (h) e intensidad de 14,87 (mm h⁻¹); lo que originó respuesta en los caudales total (5,55 mm), base (3,65 mm) y de tormenta (1,90 mm); con tiempos de crecida (1,68 h), descenso (4,48 h) y agotamiento (11,85 h). El coeficiente de escorrentía por evento fue de 5,13.

Tabla 4.15: Promedios y su desviación estándar, valores máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de altas precipitaciones en la cuenca Montañita (n=10)

	P (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)	Qt (mm)	Qb (mm)	Qr (mm)	Tc (h)	Td (h)	Ta (h)	Cee
Promedio	36,77	3,41	14,87	5,55	3,65	1,90	1,68	4,48	11,85	5,13
SD	21,16	3,46	8,51	3,38	2,61	1,16	1,10	3,28	7,94	1,62
Min	18,54	0,83	6,01	2,51	1,53	0,54	0,58	2,50	4,42	2,82
Max	80,76	12,92	31,01	11,96	8,87	3,96	3,58	13,50	24,42	7,58
CV (%)	57,54	101,55	57,22	60,89	71,55	61,15	65,25	73,14	67,04	31,55

P: Precipitación, D: Duración, I: Intensidad, Qt: Caudal total por evento, Qb: Caudal base por evento, Qr: Caudal de tormenta o rápido por evento, Tc: Tiempo de crecida, Td: Tiempo de descenso, Ta: Tiempo de agotamiento. Cee: Coeficiente de escorrentía por evento.

4.6.2.4 Cuenca Pastos.

En el periodo de investigación, en la época de bajas precipitaciones la respuesta de la cuenca Pastos a los eventos de lluvia se exhibe en la tabla 4.16; en definitiva, la precipitación promedio diaria fue de 6,02 (mm), con una duración de 1,5 (h) e intensidad de 7,6 (mm h⁻¹); lo que produjo respuestas en los caudales total (4,4 mm), base (4 mm) y de tormenta (0,5 mm); con tiempos de crecida (0,6 h), descenso (7,1 h) y agotamiento (16,2 h). El coeficiente de escorrentía por evento fue de 7,31.

Tabla 4.16: Valores promedios y desviación estándar, máximo, mínimo y coeficiente de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de bajas precipitaciones en la cuenca Pastos (n=12)

	P (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)	Qt (mm)	Qb (mm)	Qr (mm)	Tc (h)	Td (h)	Ta (h)	Cee
Promedio	6,2	1,5	7,6	4,4	4	0,5	0,6	7,1	16,2	7,31
SD	3,4	1,2	7	1,1	1	0,2	0,7	2,3	6,4	2,5
Min	1,6	0,3	1,1	2,3	1,9	0,1	0,1	3,6	3,4	2,84
Max	12,4	4,2	22,8	6,1	5,4	0,7	2,3	10,9	26,7	10,4
CV (%)	54,3	81,5	92,6	25,3	25,8	52,7	115,8	32,2	39,2	34,17

P: Precipitación, D: Duración, I: Intensidad, Qt: Caudal total por evento, Qb: Caudal base por evento, Qr: Caudal de tormenta o rápido por evento, Tc: Tiempo de crecida, Td: Tiempo de descenso, Ta: Tiempo de agotamiento. Cee: Coeficiente de escorrentía por evento.

Con respecto a la época de altas precipitaciones, la respuesta de la cuenca Pastos a los eventos de lluvia se presenta en la tabla 4.17. La precipitación promedio diaria registrada fue de 26 (mm), con una duración de 3,80 (h) e intensidad de 11,6 (mm h⁻¹); lo que originó, en promedio, una respuesta en los caudales total (7,3 mm), base (5,4 mm) y de tormenta (2 mm); con tiempos de crecida (1,2 h), descenso (8,1 h) y agotamiento (18,5 h). El coeficiente de escorrentía por evento fue de 7,5.

Tabla 4.17: Promedios y su desviación estándar, valores máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de altas precipitaciones en la cuenca Pastos (n=12)

	P (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)	Qt (mm)	Qb (mm)	Qr (mm)	Tc (h)	Td (h)	Ta (h)	Cee
Promedio	26	3,8	11,6	7,3	5,4	2	1,2	8,1	18,5	7,5
SD	6	2,5	9,1	1,7	1,3	0,8	1,2	5,4	6,6	2,2
Min	19,8	1,2	2,9	4,8	3,2	0,9	0,3	3,6	9,7	4,1
Max	36,8	7,7	28,5	10,1	7,8	3,4	3,6	21,8	29,8	11,4
CV (%)	23,1	65,9	78,6	23,6	24,6	42,6	97,5	66,9	35,8	29,6

P: Precipitación, D: Duración, I: Intensidad, Qt: Caudal total por evento, Qb: Caudal base por evento, Qr: Caudal de tormenta o rápido por evento, Tc: Tiempo de crecida, Td: Tiempo de descenso, Ta: Tiempo de agotamiento. Cee: Coeficiente de escorrentía por evento.

4.6.3 Curva de duración de caudales y regulación-retención.

4.6.3.1 Curva de duración de caudales.

Las curvas de excedencia de caudales del periodo de estudio (1/07/2017 hasta el 31/10/2018) se presentan en la figura 4.24, donde se evidenció que en todas las cuencas monitoreadas menos del 4 % de los caudales presentaron valores mayores a 6 (mm d^{-1}), lo que significa que sus respuestas son rápidas ante elevadas cantidades de lluvia.

En la cuenca El Silencio menos del 20 % de los caudales excedencia presentaron un valor máximo de 12,3 (mm d^{-1}) y un valor medio de 4,48 (mm d^{-1}) los cuales son mayores en comparación con las cuencas Montañita y Pastos. Por otro lado, el 80 % de los caudales de excedencia mostraron valores menores a 1,68 (mm d^{-1}) los cuales son menores a los evidenciados en las cuencas Montañita y Pastos según lo observado en las altas excedencias al final de la curva. Este comportamiento es característico de cuencas torrenciales donde el caudal responde rápidamente ante eventos de lluvia.

Por el contrario, la cuenca Montañita tiene una curva de menor pendiente con respecto a El Silencio; la cual indica que la respuesta en caudales a eventos de lluvia no fluctúa abruptamente en el tiempo, además es la cuenca que mayor valor tiene en el 100 % de excedencia. El caudal máximo que presentó fue de 8,53 (mm d^{-1}) y el mínimo de 3,26 (mm d^{-1}), con un porcentaje de excedencia para el caudal medio 4,45 (mm d^{-1}) del 45 %.

Por su parte, la cuenca de Pastos en el rango de 0 a 20 % de excedencia presentó los caudales más altos, este comportamiento es similar al de la cuenca Montañita. De igual forma, el comportamiento de la curva en el rango de 70 a 100 % es semejante al de la cuenca El Silencio; sin embargo, en el 100 % de excedencia esta tiene un valor de 2,49 (mm d^{-1}). En lo que respecta al caudal medio este tuvo un porcentaje de excedencia del 41 % equivalente a 4,15 (mm d^{-1}) y el caudal máximo fue de 8,14 (mm d^{-1}).

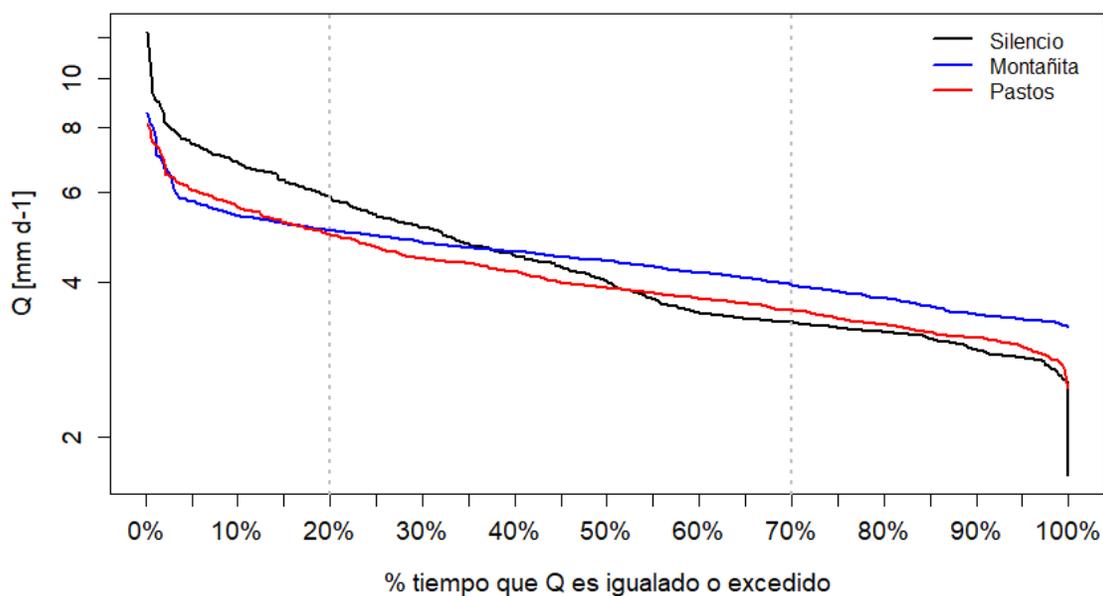


Figura 4.24: Curva de probabilidad de excedencia de caudales para las tres cuencas hidrográficas estudiadas.

4.6.3.2 Índice de retención y regulación hídrica (IRH).

Los valores del índice de retención hídrica calculado para cada una de las cuencas son presentados en la tabla 4.18. De acuerdo con la clasificación del IDEAM (2010), Montañita y Pastos presentaron una muy alta retención y regulación de humedad mientras que El Silencio presentó una alta retención y regulación de humedad.

Tabla 4.18: índice de retención y regulación hídrica (IRH).

Índice	Cuencas hidrográficas		
	El Silencio	Montañita	Pastos
IRH	0,85	0,93	0,90

4.6.4 Índice de flujo base (IFB).

En la tabla 4.19 se presenta el índice de flujo base determinado para las cuencas hidrográficas estudiadas, los cuales mostraron comportamientos diferenciales entre sí. En relación con los resultados obtenidos el 85,90 % de los caudales totales generados en la cuenca El Silencio son de flujo base y el 14,1 % son escorrentía directa, mientras que la cuenca Montañita presentó el 92,03 % de los caudales totales como flujo base y el 7,97 % como escorrentía directa, por su parte la cuenca de pastos acumula el 86,97 % del caudal total como flujo base y el 13,03 % como escorrentía directa.

Tabla 4.19: índice de flujo base anual (IFB).

Índice	Cuencas hidrográficas		
	El Silencio	Montañita	Pastos
IFB (%)	85,90	92,03	86,97

4.6.5 Índice de estabilidad de caudales Richard Baker (IBF).

En la tabla 4.20 se registran los valores del índice de estabilidad de caudales determinado para las cuencas hidrográficas estudiadas, los cuales mostraron comportamientos diferenciales entre sí. Sin embargo, para la cuenca montañita el valor obtenido fue menor con relación a las otras dos cuencas.

Tabla 4.20: índice de estabilidad de caudales anual (IBF).

Índice	Cuencas hidrográficas		
	El Silencio	Montañita	Pastos
IBF	0,18	0,10	0,17

4.6.6 Respuesta de las cuencas a los eventos de precipitación.

La respuesta en caudales de las cuencas hidrográficas monitoreadas ante los eventos de precipitación se presenta en tres grupos (Figura 4.25). El primer grupo corresponde a eventos de alta intensidad, mediana cantidad y corta duración (columna 1), en el que se destaca la respuesta de El Silencio con un caudal rápido de $0,33 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ para un evento

de 21,89 (mm h^{-1}) de intensidad; mientras que, Montañita y Pastos presentaron caudales pico de 0,11 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) y 0,13 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), respectivamente para intensidades similares. En el segundo grupo se encuentran los eventos de mediana intensidad, alta cantidad y larga duración (columna 2), en el cual ante un evento de precipitación promedio de 23,37 mm, se puede observar que Montañita experimenta un caudal rápido de 0,17 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), en comparación a 0,13 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) en El Silencio y 0,08 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) en Pastos. El tercer grupo representa los eventos de mediana duración con intensidades y cantidades bajas (columna 3), el evento seleccionado de una intensidad promedio de 2,61 (mm h^{-1}) presenta una respuesta en caudal rápido de 0,04 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) en Montañita y un caudal base promedio de 0,02 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); por su parte, El Silencio respondió con un caudal rápido de 0,03 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e igual caudal base promedio y finalmente Pastos tuvo una respuesta de igual caudal rápido pero un caudal base promedio de la mitad en relación con las dos cuencas en restauración. En la tabla 4.21 se muestran los valores representativos de las características de los eventos de precipitación seleccionados.

Tabla 4.21: Promedios, desviación estándar, valores máximos, mínimos y coeficientes de variación de los eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de estudio (n=9).

	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3		
	P (mm)	D (h)	I (mm h^{-1})	P (mm)	D (h)	I (mm h^{-1})	P (mm)	D (h)	I (mm h^{-1})
Prom	17,53	1,14	21,93	23,37	3,25	7,55	6,01	2,50	2,61
DE	5,98	0,29	1,04	2,43	0,80	2,26	1,65	1,17	0,67
Min	19,15	0,83	20,91	21,00	2,33	5,48	4,20	1,25	2,08
Max	31,08	1,42	22,98	25,86	3,83	9,96	7,44	3,58	3,36
CV %	0,34	0,26	0,05	0,10	0,25	0,30	0,28	0,47	0,26

P: Precipitación, D: Duración, I: Intensidad, Prom: media estadística, DE: Desviación estándar, CV%: porcentaje de coeficiente de variación.

Efectos de la restauración de los bosques montaños tropicales sobre el funcionamiento ecohidrológico de cuencas hidrográficas

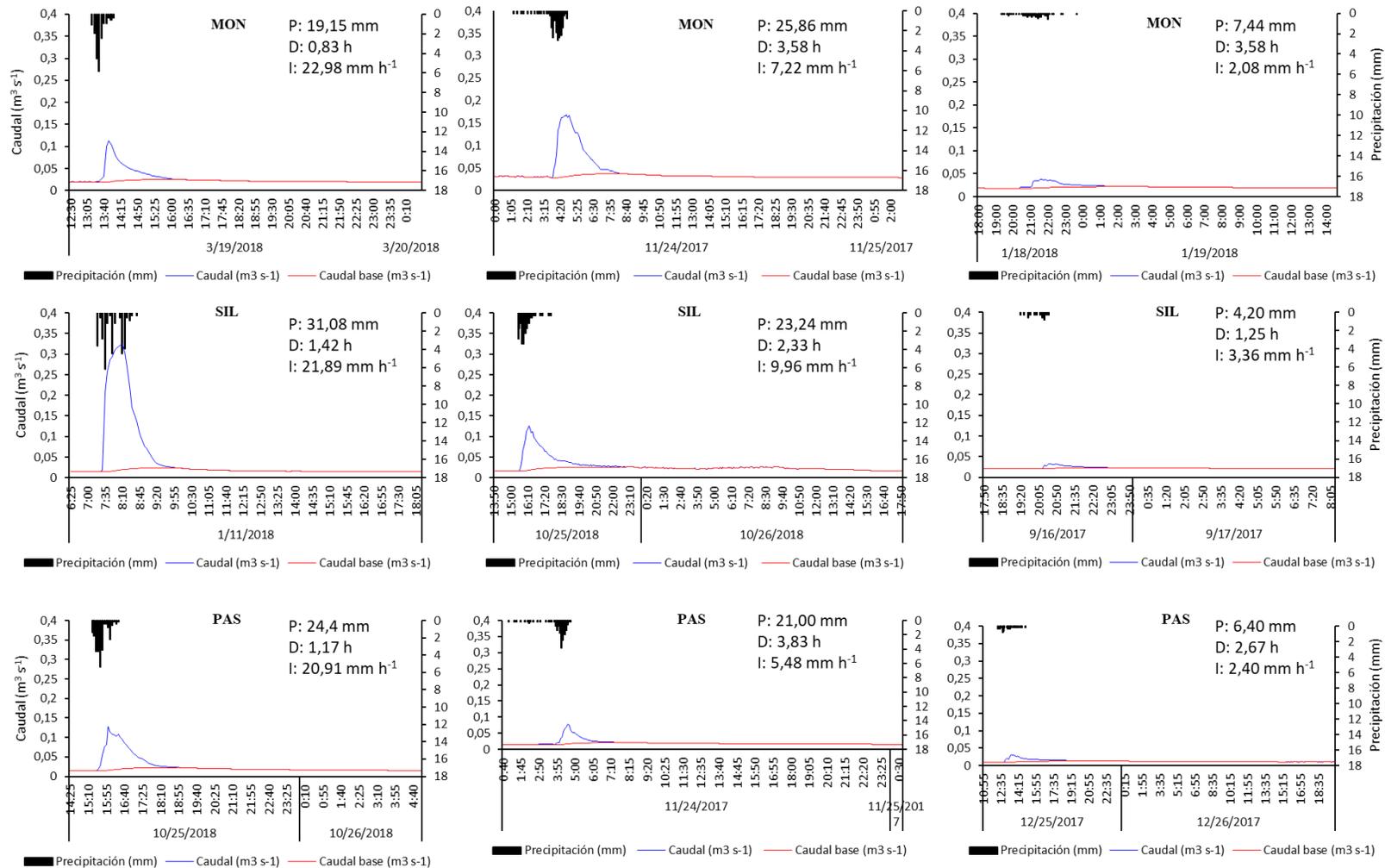


Figura 4.25: Eventos de lluvia y las respectivas respuestas de los caudales durante el periodo de estudio para: SIL= El Silencio, MON= Montaña y PAS = Pastos. Los números en el recuadro señalan la precipitación total registrada (P en mm), la duración en horas (D) y la intensidad (I en mm h⁻¹) para cada uno de los eventos seleccionados.

4.6.7 Rendimiento Hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE).

En la tabla 4.22 se muestran los resultados de las estimaciones de rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE) hallados para 14 meses de registro en cada cuenca de monitoreo. En relación con el rendimiento hídrico, las cuencas El Silencio y Montañita presentaron valores similares; sin embargo, la cuenca Pastos presentó el valor mayor de rendimiento hídrico.

Por otra parte, el coeficiente de escorrentía mostró variaciones entre las cuencas, donde pastos obtuvo el mayor valor con 8,3 %; seguido de El Silencio con 8,05 % y Montañita con 4,33 %.

Tabla 4.22: Rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE) determinados para las cuencas monitoreadas durante el periodo de medición.

Índices	Cuencas hidrográficas		
	El Silencio	Montañita	Pastos
RH	0,57	0,54	0,63
CEA (%)	8,05	4,33	8,30

4.6.8 Balance hídrico.

En la figura 4.26 se muestran los valores promedios anuales de la precipitación (P), caudal total (Qt), evapotranspiración real (ETa) y contenido de humedad del suelo (CHS) de las cuencas hidrográficas monitoreadas. El régimen precipitaciones en las tres cuencas fue bimodal, se presentaron dos periodos de altas precipitaciones comprendidos entre los meses de marzo a abril y de septiembre a noviembre y dos periodos de bajas precipitaciones abarcadas entre los meses de diciembre a enero y de junio a agosto; para el periodo de estudio la cuenca Montañita registró la mayor precipitación acumulada (P), caudal (Qt) y evapotranspiración real (ETa). Adicionalmente, en la tabla 4.23 se presentan los valores anuales de las diferentes variables del balance hídrico en términos de

percolación para cada una de las cuencas hidrográficas, apreciándose que la cuenca El Silencio presentó la mayor tasa de percolación anual con 365,85 mm

Tabla 4.23: Balance hídrico anual para las cuencas de El Silencio, Montañita y Pastos expresados en lámina (mm y⁻¹)

Estación	P (mm y ⁻¹)	Q _t (mm y ⁻¹)	ET _a (mm y ⁻¹)	delta de CHS (mm y ⁻¹)	Percolación profunda (mm y ⁻¹)
El Silencio	2715,77	1626,90	1403,55	-51,17	365,85
Montañita	2859,60	1634,10	1417,71	-67,33	259,54
Pastos	2180,74	1470,49	753,62	-51,37	94,74

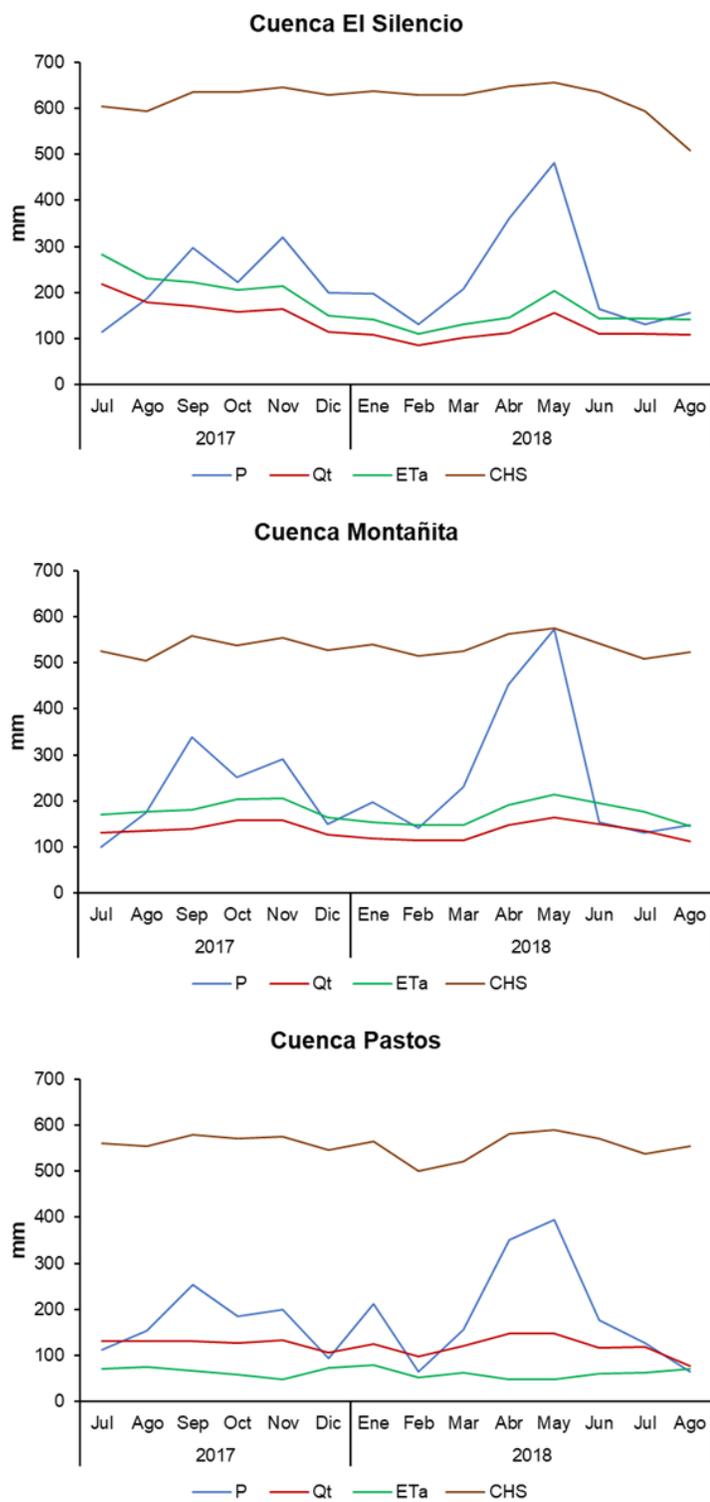
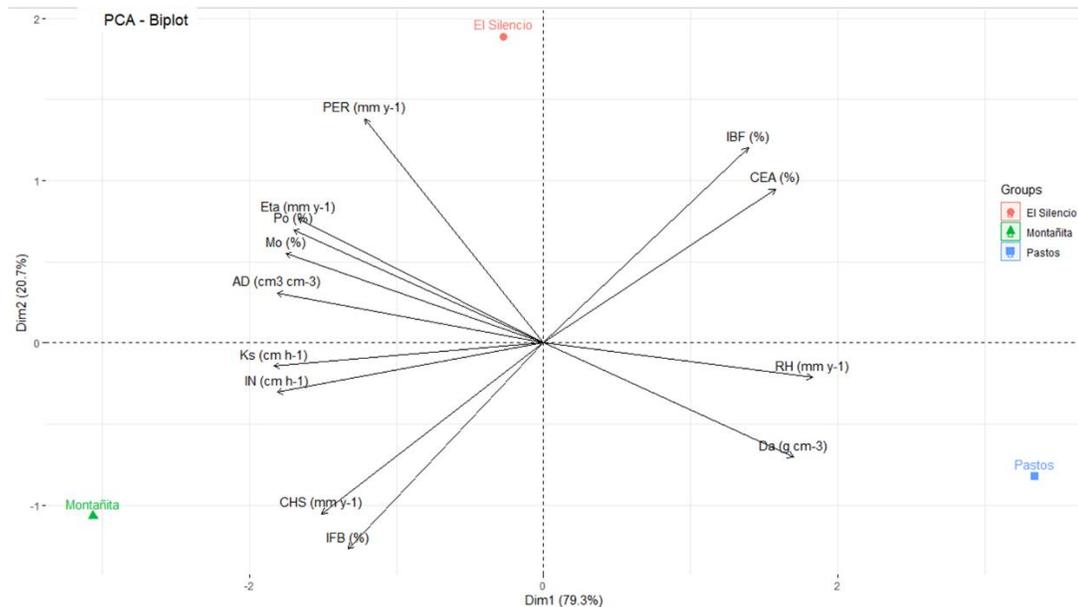


Figura 4.26: Escala mensual de las diferentes variables del balance hídrico para las cuencas de estudio (Jul/2017 – Ago/2018). P = precipitación, Qt = Caudal total desde cada una de las cuencas estudiadas, ETa = evapotranspiración real y CHS = cambios en la humedad del suelo.

4.7 Análisis de Componentes Principales (ACP).

Los factores uno y dos del ACP explican el 100% de la variabilidad de los datos; El factor uno (Dim 1) explica el 79,3 % de la variabilidad de los datos en función de las variables: conductividad hidráulica saturada (Ks), infiltración (IN) y rendimiento hídrico (RH). El factor dos (Dim 2) explica el 20,7 % de los datos en función de las variables: percolación (PER), el índice de flujo base (IFB) y el índice de Baker Flashiness o de estabilidad de caudales (IBF). Adicionalmente se evidencia que el contenido de humedad del suelo (CHS) y el índice de flujo base (IFB) son ortogonales al índice de Baker Flashiness (IBF) y el coeficiente de escorrentía anual (CEA); así mismo la densidad aparente (Da) es ortogonal con la porosidad (Po). Es decir, a mayor CHS y IFB menor IBF y CEA, y a mayor Da menor Po. Con respecto al espacio de ordenación, la cuenca Montañita estuvo definida por la mayor IN, Ks, CHS y IFB. Mientras que la cuenca El Silencio estuvo determinada por el mayor PER y la cuenca Pastos por la mayor densidad aparente (Da) y RH.



Da: Densidad aparente; Po: Porosidad; IN: Infiltración; Ks: Conductividad hidráulica saturada; MO: Materia orgánica; CHS: contenido de humedad del suelo; AD: Agua disponible; ETa: Evapotranspiración real; IFB: Índice de flujo base; IBF: Índice de Baker Flashiness; PER: Percolación; RH: Rendimiento hídrico; CEA: Coeficiente de escorrentía anual.

Figura 4.27: Análisis de Componentes Principales (PCA).

5 Discusión

5.1 Morfometría de las cuencas hidrográficas.

Las cuencas hidrográficas El Silencio, Montañita y Pastos pertenecen a sistemas hidrogeomorfológicos de pequeñas magnitudes de carácter endorreico. Las dos primeras sus sistemas de drenaje pertenecen a la microcuenca de la quebrada La Miel la cual es tributaria del río El Buey, que a su vez es afluente del río Arma y finalmente desemboca en el río Cauca, mientras que la última su red de drenaje desemboca en la quebrada Laureles que a su vez es afluente de la quebrada La Miel. En relación con los autores (Esquivel-arriaga, Bueno-hurtado, Sánchez-Cohen, Velásquez-Valle, & Muñoz-Villalobos 2015) los parámetros morfométricos relacionados con el tamaño de estas cuencas (área, perímetro y longitud de la cuenca) (Tabla 4.1), permitieron generar una idea de la naturaleza y el comportamiento hidrológico estas cuencas. La cuenca El Silencio presentó un factor de forma ensanchado, el cual indica que ante la ocurrencia de un evento de precipitación en esta cuenca; ella aumentara rápidamente el caudal. Por otra parte, La cuenca Montañita que presentó un factor de forma ligeramente ensanchada; el cual hace referencia a que, durante la ocurrencia de un evento de precipitación, esta cuenca presenta aumentos lentos en caudal. Por otro lado, la cuenca de Pastos que mostró un factor de forma alargado, indica que por lo tanto no es propensa a presentar aumentos súbitos en caudal cuando se presentan eventos de lluvia intensos en toda o en gran parte de la cuenca.

En relación con la altura mínima y máxima (msnm), estas permiten determinar el relieve máximo para cada una de las cuencas. Las pendientes medias indicaron que, por encima de estos valores, estas cuencas en sus zonas de montaña los cauces transitan por pendientes relativamente escarpadas donde ocurren los procesos erosivos los cuales están asociados con las mayores velocidades del agua de escorrentía en este sector, que condicionan un alto potencial erosivo y de arrastre de sedimentos. Por debajo de los valores de las pendientes medias, estas cuencas presentan pendientes más suaves donde ocurren los procesos de deposición de sedimentos.

En relación con la longitud del cauce principal, la cuenca El Silencio hace un recorrido de menos de 1 km desde su nacimiento hasta su punto de cierre, a través de este se describe un perfil longitudinal con fuertes cambios de pendiente y por ende de su gradiente hidráulico, lo cual indica que esta cuenca presenta una alta probabilidad a experimentar crecidas súbitas, con hidrogramas de caudales picos elevados y de corta duración, altas velocidades del flujo y mayor capacidad de transporte de materiales. Por su parte, la cuenca Montañita hace un recorrido de más de 1 km desde su nacimiento hasta su punto de cierre, en donde se evidencia cambios de pendiente y de gradiente hidráulico en menor proporción en comparación con El Silencio; lo cual hace referencia a que esta cuenca, igualmente, presenta una alta probabilidad a experimentar crecidas súbitas, con hidrogramas de caudales picos no tan elevados y de larga duración, velocidades del flujo normales y buena capacidad de transporte de sedimentos. En contraste con Montañita, la cuenca Pastos hace un recorrido igual de más de 1 km desde su nacimiento hasta su punto de cierre, pero por su forma esta cuenca es ligeramente susceptible a experimentar crecidas con hidrogramas de caudales pico no elevados y de larga duración.

Los valores de los factores de forma e índices de alargamiento y Gravelius (Tabla 4.1), en conjunto indican que las cuencas El Silencio y Montañita tienen una forma circular, con altas probabilidades a presentar crecidas con mayores caudales; mientras que la cuenca de Pastos tiene una forma oval oblonga, lo que hace referencia a que esta cuenca tiene una baja probabilidad de experimentar frecuentes crecidas, debido a que su forma limita exponer toda su superficie al radio de acción de una determinada tormenta (Cruz Romero, Gaspari, Rodríguez Vagaría, Carrillo González, & Téllez López, 2015).

5.2 Propiedades físicas del suelo.

5.2.1 Densidad aparente (Da).

En relación con los resultados de la tabla 4.4, la densidad aparente en los sitios de estudio aumentó en relación con la profundidad del suelo, esto puede estar relacionado con la

estructura y el contenido de materia orgánica que presentó cada horizonte dado que este último, en conjunto con las excreciones de microorganismos y el mucus de lombrices permite la formación y estabilización de agregados, lo cual es importante para la regulación del flujo de agua, nutrientes y el almacenamiento y el flujo de gases, que a su vez influye en la actividad y desarrollo de los organismos vivos (Haddad 2004).

Los sitios El Silencio y Montañita no presentaron diferencias estadísticas entre sí en cada uno de sus horizontes; esta situación puede estar relacionada con la similitud en la estabilidad estructural, textura, materia orgánica y raíces finas presentes en el suelo. Por ejemplo, las raíces finas favorecen los cambios en la estructura del suelo, particularmente en la conectividad de los poros, los cuales se reordenan y mejoran el drenaje e incrementan los potenciales mátricos de la rizosfera, lo que permite aumentar el número de macroporos y disminuir la D_a (Rodríguez, Herrera y Madero, 2000; Whalley *et al.*, 2005; Serrano-Muela, 2012), así como por el manejo que se le otorgó al suelo después del proceso de restauración ecológica (> 10 años). Al comparar los valores obtenidos en estos sitios con los del Manobo en Tacloban, Filipinas, que tuvo un proceso de restauración ecológica (> 23 años) ($1,03 \text{ g cm}^{-3}$; Zhang *et al.*, 2019), estos son menores; pero si son comparados con los reportados por Nanzyo, (2002) ($0,55 \text{ g cm}^{-3}$) y McDaniel, Lowe, Arnalds y Ping (2012) ($0,67 \text{ g cm}^{-3}$) estos son similares. Esto permite evidenciar que los cambios a corto, mediano o largo plazo que pueda presentar la D_a estarán condicionados principalmente por la estructura del suelo. Por otro lado, los valores de D_a de estos sitios permitieron inferir que estos suelos poseen una alta porosidad y capacidad de almacenamiento de agua, lo que permite que los niveles de flujo base incrementen.

El sitio de Pastos en relación con El Silencio y Montañita presentó diferencias estadísticas en cada uno de sus horizontes, esto puede atribuirse a la presión que se genera en el suelo por el pisoteo del ganado, la cual deteriora su estructura y por ende se deforma la arquitectura de la fracción sólida y el espacio poroso (Volveras-Mambuscay, Amézquita-Collazos y Campo-Quesada, 2016), que consecuentemente genera una alta probabilidad de aumento en caudales pico ante un evento de precipitación en este sitio. En comparación con otros estudios, Zhang *et al.*, (2019) reportó en el sitio de Basper, localizada en Tacloban, Filipinas, el cual presenta una cobertura de pastos una D_a de $1,14 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$, la cual es mayor a la hallada en este estudio. De igual forma, otros autores en esta misma

región también reportaron D_a mayores a las de este estudio, las cuales oscilaban entre los 0,9 y 1,2 (g cm^{-3}) (Jasmin, 1976; Costales, 1979; Ohta, 1990; Snelder, 2001b). Por otra parte, Vásquez Velázquez (2016) reportó en un sitio con cobertura de pastos, en el Departamento de Risaralda, una D_a de 0,63 (g cm^{-3}), la cual es inferior a la reportada en este estudio. Lo anterior puede deberse al tipo de textura, estructura y materia orgánica del suelo, así como a la capacidad de carga.

5.2.2 Porosidad (α).

De acuerdo con los resultados de la tabla 4.5, la porosidad de los sitios de estudio disminuyó en relación con la profundidad del suelo, este comportamiento puede estar relacionado con la estructura del suelo, dado que si las condiciones de esta propiedad son malas la densidad aparente tiende a aumentar como consecuencia de la reducción del espacio poroso (González *et al.*, 2008).

Los sitios El Silencio y Montañita no presentaron diferencias estadísticas entre sí en cada uno de sus horizontes; esto puede deberse a la semejanza que presenta la estabilidad estructural; la textura y materia orgánica del suelo en estos sitios. Estos factores permiten que estos suelos tengan un mayor tamaño, abundancia y distribución de poros; lo que genera una mayor infiltración y capacidad de almacenamiento de agua, así como también permite un mejor intercambio físico-químico y biológico entre las diferentes fases presentes en el suelo (Ruiz-Camacho *et al.*, 2009). En contraste con otros sitios que presentaba esta misma cobertura vegetal; Zhang *et al.*, (2019), encontraron en Manobo en Tacloban, Filipinas una porosidad del 52,5 %, la cual es menor a la reportada en este estudio. Esto podría ser por el grado de compactación, tipo de textura y contenido de materia orgánica que poseía el suelo.

El sitio de Pastos en contraste con El Silencio y Montañita presentó diferencias significativas en los horizontes B y C, este comportamiento puede ser por el uso del suelo. Dado que, las cargas que soporta el suelo por la actividad ganadera en este sitio son

bastante altas, lo que genera que la densidad de volumen aumente (Jaramillo J., 2002) y el espacio poroso disminuya producto del cambio de forma, tamaño y distribución de los poros; lo cual limita la capacidad de retención del suelo y el intercambio hídrico y gaseoso del suelo, (Berli, 2001; Gysi, Maeder y Weisskopf, 2001; Germer *et al.* 2010). En relación con Zhang *et al.* (2019), el reportó en Basper un sitio con cobertura de pastos en Tacloban Filipinas una porosidad del 51 %, la cual es mucho menor con la de este estudio, esto puede ser porque la fuerte degradación que presentaba la estructura del suelo.

5.3 Propiedades hidráulicas del suelo.

5.3.1 Infiltración.

Las diferencias estadísticas que presentaron las cuencas El Silencio y Montañita entre sí pueden estar relacionadas con el efecto de la restauración ecológica sobre las propiedades físicas del suelo tales como: estructura, densidad aparente y porosidad. El proceso de restauración en Montañita lleva un periodo de más de 15 años, más que en El Silencio, lo que conlleva a que las especies vegetales que existen en este sitio posiblemente presenten un desarrollo más avanzado de sus raíces finas y gruesas, lo que genera mejorías en la estructura del suelo, evidenciándose una disminución de la densidad aparente y un aumento de la porosidad (Rodríguez-Vásquez, Aristizábal-Castillo y Camacho-Tamayo, 2008), lo que mejoró su capacidad de retención y transmisión de agua en el suelo (Hillel 1980; Mapa 1995; Wahren, Feger, Schwarzel y Münch, 2009; Vásquez Velázquez, 2016) y permite una mejor recarga de las reservas hídricas subsuperficiales en este sitio (Regüés y Nadal-Romero, 2012; Crespo *et al.*, 2010).

De igual forma, que la cuenca Pastos haya presentado diferencias significativas con Montañita, esta posiblemente relacionado con una disminución de la estabilidad estructural (Vidal, Fernández y Duarte, 1981), provocada por las cargas generadas por el pisoteo del ganado, las cuales pueden superar la resistencia a la deformación del suelo y ocasionar una reducción del espacio poroso, lo que limita el intercambio de agua y aire con la

atmosfera (Osuna-Ceja *et al.*, 2006; Li, Tullberg, Freebairn y Li, 2009; Muhammad y Rattan, 2009) y provoca que el agua presente en la superficie del suelo no se infiltre totalmente, sino que por el contrario, gran parte de esta se convierta en escorrentía superficial y con ello disminuya el flujo base (Vásquez Velázquez, 2016; Neary, Ice y Jackson, 2009; Germer *et al.*, 2010; Lana-Renault, 2008).

5.3.2 Conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s).

En relación con los resultados de la tabla 4.7, la conductividad hidráulica saturada (K_s) en los sitios de estudio disminuyó con la profundidad del perfil del suelo, esto posiblemente esté relacionado con la disminución de la porosidad debido a una mayor compactación y aumento de la densidad aparente (Barbecho y Calle, 2012; Morikawa-Sakura y Yoshitakaba, 2014).

Los sitios El Silencio y Montañita no presentaron diferencias estadísticas entre sí en cada uno de sus horizontes. Sin embargo, Montañita presentó mayores valores absolutos esto puede estar posiblemente relacionado con la estructura y textura del suelo (Reichardt, 1985), debido a que estas dos propiedades condicionan la capacidad de transmisión de agua por parte de los distintos horizontes debido a la heterogeneidad del suelo (Saunders *et al.*, 1978). En relación con la estructura, esta define el arreglo y geometría tanto de los poros como de los sólidos presentes en el suelo (Vervoort y Cattle, 2003); mientras que la textura, caracteriza la proporción de las partículas minerales que contiene este (Alesander y Skaggs, 1987). El Silencio por presentar un aumento de la fracción gruesa en el solum del suelo provocó que la K_s disminuyera, debido a los materiales gruesos que sustituyen al suelo, generan una disminución del área efectiva de la porosidad drenable. Autores como Zhang *et al.*, (2019), encontraron en el sitio de Manobo, el cual se encontraba bajo el proceso de restauración ecológica una K_s de 36,8 (cm h^{-1}), la cual es superior a la determinada en estos sitios; esto puede estar relacionado con la porosidad y contenido de humedad que presentaba este sitio (Hillel, 1982).

En cuanto al horizonte B, la Ks en la cuenca El Silencio fue menor que la de Montañita y mayor que la de Pastos; esta situación se encuentra relacionada con el contenido de humedad del suelo (Figuras 4.18 hasta 4.23). Debido a que el contenido de humedad del suelo en la cuenca Montañita fue mayor que el de El Silencio y Pastos, lo que contribuyó a que la Ks fuera mayor en este sitio con respecto a los otros. Por otra parte, los valores de Ks de las cuencas El Silencio y Montañita se encontraron por encima de los reportados por Zhang *et al.* (2019) en la cuenca Manobo, ($3,7 \text{ cm h}^{-1}$), esta situación se puede atribuir a que la macroporosidad e infiltración en este horizonte es mucho mayor que la hallada en el Manobo.

Por otra parte, que el sitio de Pastos en relación con El Silencio y Montañita haya presentado diferencias estadísticas en cada uno de sus horizontes, también está relacionado con textura y estructura del suelo. La estructura del suelo está en función de la textura y del contenido de materia orgánica, pero también de la actividad biológica, de los ciclos húmedos y secos del suelo y del manejo que se realiza sobre este recurso (Hartge y Horn, 1999). La actividad ganadera en el sitio de Pastos afectó la estructura del suelo, esto generó una disminución del número de poros y modificó la distribución de estos, limitando al suelo en su capacidad de transmitir agua (Ellies, Grez y Ramírez, 1997) y aire (Dec, Dörner y Balocchi, 2010). En contraste con Zhang *et al.* (2019), el autor reportó en el sitio de Basper con cobertura de pastos una conductividad hidráulica saturada de $2,8 \text{ (cm h}^{-1}\text{)}$, la cual es inferior a la determinada en este estudio. Otras investigaciones desarrolladas en el palotrópico en sitios con coberturas de pastos reportan valores promedios de $15 \text{ (cm h}^{-1}\text{)}$ (Snelder, 2001a; Ziegler *et al.*, 2004; Zwartendijk *et al.*, 2017), los cuales son mayores que el determinado en esta investigación. Lo anterior se debe a que la conductividad hidráulica está fuertemente ligada a la estructura del suelo, al volumen de macroporos y a la interconexión y continuidad entre ellos (Tobón *et al.*, 2010; Vásquez Velázquez, 2016).

5.3.3 Capacidad de retención de humedad.

En relación con los resultados de la tabla 4.8, la diferencia entre las constantes de humedad del suelo a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) determinan el agua disponible (AD) para las plantas, la cual disminuyó con la profundidad del suelo en cada uno de los sitios de estudio. Esta situación probablemente esté relacionada con los contrastes texturales y estructurales que se presentan a lo largo del perfil del suelo (Zotarelli, Dukes y Morgan, 2013).

Por otro lado, El Silencio y Montañita no mostraron diferencias estadísticas para las constantes de CC, PMP y AD en cada uno de sus horizontes. Sin embargo, Montañita en el horizonte B presenta un rango AD mayor que El Silencio; esto probablemente podría ser por el tipo textura arcillo limosa y el número de mesoporos, debido a que este tipo de textura, más un gran porcentaje de mesoporos, permite que el suelo tenga una mayor capacidad de retención de agua (Amézquita, 2000). Autores como Yi, Li, y Yin (2012) mencionan que las propiedades físicas que condicionan la capacidad de retención de agua en el suelo son la textura y porosidad; una textura con un porcentaje moderado de arcilla y un gran número de mesoporos en el suelo permite que presenten una alta capacidad de retención de agua, y a su vez una alta retención y regulación hídrica (Ospina, 2003). En lo que respecta a Pastos, este tampoco presentó diferencias estadísticas para las constantes de CC, PMP y AD en cada uno de sus horizontes en relación con El Silencio y Montañita. Sin embargo, la capacidad de retención de agua en el suelo en este sitio es menor debido al detrimento de la estructura y porosidad (mesoporos).

En el horizonte A y C, la humedad del suelo a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PMP) fueron mayores en la cuenca El silencio en comparación con Montañita y Pastos (Tabla 4.8). Esto se debe a que la textura de la cuenca El Silencio tiene una mayor capacidad de retención de humedad del suelo, por lo cual sus rangos a CC y PMP son más amplios. En relación con estos valores hallados en esta investigación y los obtenidos por Yi *et al.* (2012) se aprecia que la capacidad de campo en suelos degradados de uso de pastizales en el perfil de 0 a 10 cm aumenta y luego disminuye pasando de 13,09 % a 20,04 % los cuales están por debajo de lo reportado en esta investigación, esto sucede

porque la estructura del suelo de la región de Junmuchang se encontraban más deterioradas que la de las cuencas El Silencio y Montañita las cuales presentan una alta conductividad hidráulica y baja escorrentía.

En el horizonte B, los valores de CC y PMP en la cuenca El Silencio fueron menores que en la de Montañita y mayores a los de Pastos (Tabla 4.8). Esto es atribuible a que la porosidad (microporos) en la cuenca Montañita es mucho mayor en relación con El Silencio y Pastos, lo que permite que esta cuenca tenga una mayor capacidad de almacenamiento de agua por ende los contenidos a CC y PMP sean más altos que en las otras dos cuencas. En relación Yi *et al.* (2012) afirman que los contenidos de humedad en suelos de praderas alpina con arbustos aumentan-disminuyen-aumentan con un rango de cambio de 10,53 % a 20,50 % a CC. Para lo cual mencionan que la porosidad del suelo en estos perfiles es reducida lo que lleva a que la capacidad almacenamiento, retención y regulación de agua se reduzca (Ospina, 2003).

De acuerdo con los resultados, la retención de humedad es la propiedad más afectada por los cambios de uso del suelo, siendo los suelos de la cuenca de Pastos los que presentaron menor capacidad de retención de humedad, lo que a su vez afecta directamente su comportamiento hidrológico. Por otro lado, los suelos de las cuencas El Silencio y Montañita que fueron sometidos a los procesos de restauración ecológica presentaron los cambios más significativos en sus propiedades físicas e hidráulicas, al compararlo con los suelos de Bosque Natural, lo que permitió entender el efecto e importancia de la restauración ecológica.

5.4 Materia orgánica.

En relación con los resultados de la tabla 4.9, el contenido de materia orgánica (MO) en los sitios de estudio disminuyó con la profundidad del perfil del suelo, esto posiblemente esté relacionado con la actividad de las bacterias y hongos, los cuales están presentes en los primeros 15 cm de profundidad del suelo y se encargan del proceso de descomposición de la Mo, lo que ocasiona que esta se concentre en los primeros centímetros (Nerhot, Monzón, Alvarez y Rojas, 2018).

Los sitios El Silencio y Montañita no presentaron diferencias significativas entre sí en ninguno de los horizontes que conforman el solum del suelo. Sin embargo, Montañita tuvo un contenido de MO mayor que El Silencio, esto puede ser probablemente porque el proceso de restauración en Montañita lleva el doble de tiempo que El Silencio, lo que ha influido a que haya un mayor número de microorganismos que conforman el microbiota del suelo, responsable de los procesos de descomposición de los substratos orgánicos (fracción lábil) y de la resíntesis de sustancias que dan origen a otros productos metabólicos como ácidos, enzimas, polisacáridos extracelulares y CO₂ (Brady, 1989). Adicionalmente, Harris (1992) menciona que los suelos con alto contenido de materia orgánica tienden a contener más organismos con demandas complejas, y que la rizosfera del suelo posee un nivel más elevado de organismos con exigencias simples.

Por otra parte, los contenidos de MO presentes en el solum del suelo del sitio de Pastos no mostraron diferencias estadísticas con los de los sitios en restauración (El Silencio y Montañita). Sin embargo, si mostro diferencias entre sus horizontes, esto puede estar relacionado con la alta cantidad de fertilizantes que durante años fueron aplicados a los cultivos de papa (*Solanum Tuberosum*) establecidos en este sitio, así como también a los residuos de cosecha (mini tubérculos) los cuales se incorporaban al suelo (Grandy, Porter y Erich, 2002). Además, por la acumulación de biomasa de los pastos causada por el sistema radicular que presentan las gramíneas los cuales son exuberantes durante el año y por la materia orgánica aportada por las heces y orina del ganado (Wei *et al.*, 2007; Martínez- Mena *et al.*, 2008; Dominati, Patterson y Mackay, 2010; Vörösmarty *et al.*, 2004). Pero su efecto en la agregación del suelo no se evidencia por los altos valores de densidad aparente que se presentan en esta cuenca (Pereira *et al.*, 2020)

Autores como Guzmán *et al.* (2019), determinaron la MO en diferentes sitios con distintos usos del suelo. El sitio sometido al proceso de restauración ecológica tuvo una MO del 7%, mientras que el sitio bajo ganadería tuvo una MO del 5,08 %; estos valores son inferiores a los obtenidos en este estudio, esto probablemente ocurre por la relación de la actividad microbiana con la temperatura, dado que a temperaturas bajas se tiende a retardar la actividad biológica, lo que conlleva a bajas tasas de mineralización de la MO (Schnitzer, 1991). En función de lo anterior, la restauración ecológica con el paso del tiempo favorece a incrementar la MO e infiltración del suelo (Sánchez, Pinilla y Mancera, 2015); mientras

que, con el paso del tiempo, los suelos con uso ganadero solo incrementan la MO en el horizonte superficial, pero las malas condiciones estructurales que este puede presentar provocan que ante los eventos de precipitación estos suelos sean propensos a generar mayores escorrentías (Claro *et al.*, 2000; Amézquita, 1998).

5.5 Mediciones ecohidrológicas.

5.5.1 Humedad del suelo.

De acuerdo con el monitoreo de la humedad del suelo en los diferentes sitios de las cuencas hidrográficas en restauración (El Silencio y Montañita) y la cuenca hidrográfica con pastos (Pastos) (Ver Figuras 4.18 a 4.23), mostró que la dinámica espacio temporal de la humedad del suelo durante todo el desarrollo de la investigación fue mayor en El Silencio con respecto a Montañita y Pastos, debido a las variaciones presentadas entre las propiedades física e hidráulicas y contenido de materia orgánica entre cuencas. Por ejemplo, en relación con la textura, la cuenca El Silencio posee una clasificación textural de tipo Arcillo Limoso, con una mayor proporción de limo; lo que causa que se genere un aumento en su capacidad de retención de agua en el suelo. En relación con la Da y porosidad, que la primera sea menor y la segunda mayor en los primeros 25 cm del suelo; es un indicador de las buenas condiciones estructurales que tiene este perfil en esta cuenca con respecto a las demás, lo que favorece un mayor ingreso de agua desde la superficie hasta el interior del suelo, lo que a su vez concuerda con la capacidad de infiltración (Tabla 4.6), que permite que el contenido de humedad sea mayor que el de las otras cuencas. Por otra parte, la conductividad hidráulica que es la encargada de condicionar el movimiento del agua al interior del suelo; el valor presentado en El Silencio (Tabla 4.7), muestra una dinámica lenta en el movimiento de agua al interior del suelo, lo que ocasiona que el contenido de humedad no disminuya rápidamente después de los eventos de precipitación. En concordancia con los valores de materia orgánica obtenidos (Tabla 4.9), estos permiten que en El Silencio mejoren la circulación de aire en el suelo y aumente la capacidad de retención de humedad con respecto a las demás cuencas.

Por otra parte, con los resultados obtenidos en esta investigación, se logró evidenciar que los cambios del contenido de humedad del suelo están directamente relacionados con las propiedades físicas e hidráulicas de suelo y no con el ciclo diario de la evapotranspiración como afirman Gribovszki, Szilagyi y Kalicz (2010). Adicionalmente, estos resultados también permitieron evidenciar que el proceso de restauración ecológica en las cuencas El Silencio y Montañita tuvo efectos positivos con respecto a la cuenca Pastos; dado que el contenido de humedad del suelo incrementó significativamente, se redujo la escorrentía superficial y los caudales pico o de tormenta, y aumentó el caudal base.

5.5.2 Curva de duración de caudales y regulación-retención.

5.5.2.1 Curva de duración de caudales, CDC.

De acuerdo con las curvas de duración de caudales determinadas para las cuencas en restauración (El Silencio y Montañita) y la cuenca de pastos (Pastos), que la cuenca El Silencio tenga una probabilidad de menos del 20 % de exceder su caudal medio con respecto a la que presenta Pastos (Figura 4.24), puede estar relacionado con los parámetros físicos del suelo como son: textura, densidad aparente (D_a) y porosidad (%); debido a que estos parámetros condicionan la capacidad de retención de humedad del suelo, y por ende las respuestas en caudal que presente la cuenca. Es decir, la cuenca El Silencio por presentar una mayor proporción de arcilla en su composición textural, una menor D_a y una mayor porosidad; tiene una mayor capacidad de retención de humedad y con ello una menor probabilidad que ante un evento de precipitación se exceda su caudal medio. Por otra parte, que la cuenca Pastos tenga una probabilidad mayor al 20 % de exceder su caudal medio en relación con las cuencas en restauración; también puede estar relacionado con las propiedades físicas e hidráulicas que presentan sus suelos; ya que por presentar una D_a mayor, esta disminuye la capacidad de infiltración y conductividad hidráulica de suelos; lo que causa que esta cuenca pueda exceder rápidamente su caudal medio y se realicen pocos aportes al caudal base.

En relación con Vásquez Velázquez (2016), el autor determinó las curvas de duración de caudales (CDC) para las cuencas con cobertura de bosque natural y pasturas localizadas en la región de Los Andes (Colombia); encontrando que los caudales máximos de la cuenca con cobertura de bosque natural en el rango de 0 y el 10 % de excedencia son aproximadamente la tercera parte de los de la cuenca con cobertura de pasturas, y su discurrir hasta el 100 % de excedencia es el más alto, sin llegar a agotarse. Mientras que la cuenca con cobertura de pasturas genera de forma muy relevante y de manera ocasional caudales máximos de gran magnitud en el rango de excedencia de 0 y 20%, y posterior a este rango los caudales que genera son muy bajos logrando agotarse. Sin embargo, estos resultados no concuerdan con esta investigación debido a que la cuenca Pastos en relación con las cuencas en restauración presentó una menor pendiente y una forma alargada, estos factores determinaron la regulación hidrológica.

5.5.2.2 Índice de retención y regulación hídrica (IRH).

De acuerdo con la curva de duración de caudales, las cuencas Montañita y Pastos presentaron una muy alta retención y regulación hídrica está asociado con la menor generación de caudales rápidos que presentan estas cuencas. Para el caso de Montañita esto se debe a la homogeneidad que presenta en sus propiedades físicas e hidráulicas entre horizontes del perfil de suelo. Mientras que para Pastos la pendiente y forma de esta cuenca favorece a que se presente esta condición. En relación con Vásquez Velázquez (2016), los índices de retención y regulación hídrica (IRH) determinados para las cuencas con cobertura de bosque natural (0,71) y Pasturas (0,47) localizadas en Los Andes Centrales (Colombia). En el caso particular para la cuenca Pastos, lo anterior no concuerda con lo obtenido en esta investigación debido a la influencia que tienen los ya mencionados parámetros morfométricos (forma y pendiente) en el caudal asociado. Sin embargo, los resultados para bosque natural del estudio de Vásquez Velázquez (2016) son consecuentes con los hallados en las cuencas bajo restauración ecológica (El Silencio y Montañita) posiblemente por los efectos de esta en el comportamiento hidrológico.

5.5.3 Índice de flujo base (IFB).

En relación con la determinación del índice de flujo base (IFB) para cada una de las cuencas hidrográficas monitoreadas en esta investigación (Tabla 4.19), Montañita presentó un mayor IFB que El Silencio y Pastos; esto probablemente esté relacionado con la conductividad hidráulica del suelo, la cual describe la movilidad del agua subterránea o superficial (Ángel y Pineda, 2019) y es dependiente de la estructura del suelo (Pérez & García, 2015). Montañita por ser sometida a un proceso de restauración ecológica de más de 15 años, ha logrado mejorar su estructura del suelo y por ende aumentar su porosidad (Macroporos) como consecuencia del desarrollo de las raíces finas y gruesas de los árboles y los posibles conductos hechos por hormigas, nemátodos e insectos (Laurance, 2007; Jarvis, 2007), así el agua que está presente en la superficie del suelo puede percolar a mayores profundidades a velocidades que se ajustan a las leyes cinemáticas y son los principales procesos que recargan del flujo base (Beven y Germann, 1982; Smettem, 2009).

Por otra parte, El Silencio mostró un menor IFB que Pastos, esto posiblemente se deba al número macroporos que presenta el suelo en este lugar, ya que estos se encargan de transportar activamente el agua al interior del suelo (Buttle y McDonald, 2002; Jarvis, 2007). La intensidad de la precipitación y el contenido inicial de humedad del suelo en este sitio determinan el tipo y número de macroporos que participan en el transporte del agua (Smettem, 2009; Alaoui *et al.*, 2011b), lo que puede cambiar sutilmente el régimen hidrológico, en particular la producción de escorrentía superficial, sub-superficial y la recarga del flujo base. Adicionalmente, otro factor que puede haber influenciado este comportamiento es la pendiente promedio de la cuenca, que al ser mayor en El Silencio tiende a incrementar la escorrentía superficial y disminuir el caudal base (Wigmosta y Prasad, 2005).

En relación con Vásquez Velázquez (2016), el autor en la región de los Andes (Colombia) reportó para cuencas con coberturas de bosque natural (BN) y pastos (P) un IFB del 93,47 y 79,28 (%) respectivamente, en el caso de BN su valor es mayor al de los sitios en restauración (El Silencio y Montañita); mientras que P es menor al de Pastos; esto puede

estar relacionado con la porosidad del suelo, la cual define la facilidad con que el agua puede fluir a través de los macroporos, siendo afectada por el tamaño de las partículas, el acomodo de las partículas y la porosidad del medio (Azuje y Guevara, 2002).

5.5.4 Índice de estabilidad de caudales Richard Baker Flashiness Index (IBF).

En relación con la determinación del índice de Richard Baker Flashiness Index (IBF) para cada una de las cuencas hidrográficas monitoreadas en esta investigación (Tabla 4.20), Montañita presentó un menor IBF que El Silencio y Pastos; esto probablemente esté relacionado con el incremento de la infiltración debido a posibles aumentos en proporción de macroporos del suelo, los cuales influyen fuertemente en el paso del agua de la superficie a capas más profundas como consecuencia de las presiones positivas que se generan localmente en la matriz del suelo (Serrano-Muela 2012), lo que provoca una disminución del flujo rápido y por ende un aumento del flujo base.

Por otro lado, El Silencio mostró un mayor IBF que Pastos, esto probablemente está relacionado con la pendiente media que presentó esta cuenca que genera mayores escurrimientos superficiales incrementando el caudal rápido (Wigmosta y Prasad, 2005).

Autores como Baker *et al.* (2004), afirman que la determinación el IBF permiten realizar comparaciones de los disturbios que presentan los canales de drenaje de cuencas hidrográficas ubicadas en una misma ecorregión. En relación con Vásquez Velázquez (2016), este reportó en la región de los Andes (Colombia) un IBF para la cuenca con cobertura de bosque natural de 0,14 y para la cuenca con cobertura de pasturas de 0,59; lo cuales son mayores a los reportados en este estudio, esto probablemente se deba a las condiciones estructurales del suelo, las cuales condicionan su porosidad.

5.5.5 Respuesta del caudal ante eventos de precipitación.

En relación con las respuestas en caudal ante eventos de precipitación de cada una de las cuencas hidrográficas monitoreadas en este estudio (Figura 4.25), El Silencio presentó la mayor respuesta en caudal en el grupo 1; esto probablemente puede estar relacionado con la pendiente y forma que tiene esta cuenca. Las pendientes pronunciadas y la forma ensanchada que tiene esta cuenca hacen que gran parte del agua proveniente de un evento de precipitación se convierta en escorrentía superficial. Los autores Wigmosta y Prasad (2005) mencionan que en las cuencas hidrográficas categorizadas como pequeñas y medianas, la forma y su pendiente establecen la forma y magnitud del hidrograma; dado que, el tiempo que permanece el agua en el sistema de canales es pequeño.

Por otra parte, Montañita mostró la mayor respuesta en caudal en el grupo 2 y 3, lo que también puede estar relacionado con los parámetros morfométricos mencionados en el párrafo anterior. Debido que, su alta pendiente y forma circular hacen que esta cuenca tenga altas probabilidades de presentar crecidas con mayores caudales (Cruz Romero *et al.*, 2015).

5.5.6 Rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía anual (CEA).

En relación con tabla 4.22 donde se presenta el rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía anual (CEA) para cada una de las cuencas hidrográficas monitoreadas en este estudio, Montañita mostró el menor RH y CEA con relación a El Silencio; esto probablemente esté relacionado con el proceso de evapotranspiración. Debido a que, los factores climáticos como: temperatura máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), radiación solar (w m^{-2}) y velocidad del viento (m s^{-1}) son más severos en este sitio; lo que causa que la tasa de evapotranspiración sea más alta, y por ende se afecte la dinámica de recarga y descarga de agua del suelo, lo que reduce el caudal total y con ello disminuya el RH y CEA (Zhao, Zhang, Xu y Scott, 2010; Wei y Zhang, 2010; Zhang, Yang, Yang y

Jayawardena, 2016). Adicionalmente, Montañita por estar un proceso de restauración ecológica de más de 15 años, presenta un mayor grado de desarrollo de su cobertura forestal, lo que produce que las demandas de evapotranspiración sean más altas (Bosch y Hewlett 1982; Farley y Kelly, 2004; Cantú y González, 2005; Buytaert *et al.*, 2006).

Por otro lado, Pastos presenta un mayor RH y CEA que El Silencio y Montañita; esto probablemente esté relacionado con la evapotranspiración, debido a que este tipo de cobertura vegetal presenta una menor tasa de evapotranspiración, lo que causa aumentos en el caudal anual de los ríos (Bruijnzeel, 2004). Sin embargo, en la época de bajas precipitaciones se registró disminuciones en el caudal; debido a la baja capacidad de infiltración producto de la compactación del suelo por el pisoteo del ganado (Wang *et al.*, 2018; Awotwi *et al.*, 2019).

Por otro lado, El Silencio tuvo un CEA similar al de Pastos, esto probablemente esté relacionado con la pendiente que presenta El Silencio y el contenido de humedad del suelo en el horizonte superficial que posee Pastos, debido a que estos factores influyen en la proporción de precipitación que se convierte en escorrentía (Pérez y García, 2015).

En relación con Vásquez Velázquez (2016), el autor encontró en Los Andes (Colombia) en un sitio con cobertura de bosque natural un RH de 0,45 (l s^{-1}) día y un CEA de 58,3 %; y en otro sitio con cobertura con pastos un RH de 0,43 (l s^{-1}) día y un CEA de 62,3 %; estos valores son menores a los reportados en este estudio. Frente a estos dos escenarios se puede evidenciar que la conversión de bosque a pastizal puede conducir a cambios importantes en los procesos de generación de escurrimiento en cuencas en respuesta a eventos de lluvia de alta intensidad (Chang, 2006).

5.5.7 Balance Hídrico.

En relación con el balance hídrico determinado en términos de percolación para cada una de las cuencas hidrográficas monitoreadas en esta investigación (Tabla 4.23), El Silencio mostró una mayor percolación que Montañita; lo que probablemente esté relacionado con la tasa de evapotranspiración (Blas y Mejía, 2014), dado que entre menor sea esta mayor

será la recarga de los acuíferos por la entrada de agua al sistema por precipitación (Regüés y Nadal-Romero, 2012; Crespo *et al.*, 2010).

Por otra parte, Pastos presentó una menor percolación con respecto a El Silencio y Montañita, Lo que probablemente también esté relacionado con la tasa de infiltración y filtración del suelo por efecto del pisoteo del ganado, el cual compacta el suelo sub-superficialmente entre los 5 y 20 cm de profundidad, lo que incrementa la densidad aparente y reduce la porosidad (macroporos) (Trimble y Mendel, 1995), limitando el intercambio de agua y aire con la atmosfera (Osuna-Ceja *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009; Muhammad y Rattan, 2009), lo que causa que el agua presenten en la superficie del suelo tenga dificultades a la hora de infiltrarse y filtrarse al interior de este, debido a que gran parte del agua proveniente de la precipitación se convierte en escorrentía superficial y lo que disminuye el flujo base (Vásquez Velázquez, 2016; Neary *et al.*, 2009; Germer *et al.*, 2010; Lana-Renault, 2008). Autores como Scanlon *et al.* (2005); Tobón *et al.* (2010) afirman que la recarga de los acuíferos que determinan el flujo base de una cuenca hidrográfica puede verse reducidos por el cambio de cobertura boscosa por pasturas al interior de estas, ya que se reduce el proceso de infiltración y transmisibilidad del agua al interior del suelo y son estos los que se encarga de conducir el agua hacia el nivel freático y acuíferos.

5.5.8 Factores que condicionan los procesos ecohidrológicos.

Finalmente, como se presenta en el análisis de componentes principales (ACP) (Figura 4.27) donde se interrelacionan de las variables ecohidrológicas con las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo y los índices de respuesta hidrológica, se evidencia que en la cuenca Montañita la conductividad hidráulica (Ks) e infiltración (IN) influyeron en el comportamiento contenido de humedad del suelo (CHS) e índice de flujo base (IFB), lo que condiciono la respuesta del índice de estabilidad de caudales (IBF) y coeficiente de escorrentía anual (CEA). En relación con lo anterior, autores como Sánchez, Pinilla y Mancera (2015) afirman que el incremento de la materia orgánica mejora la infiltración y la

conductividad hidráulica del suelo, debido a que esta se encarga de proporcionar energía a los microorganismos, los cuales en conjunto con los ácidos fúlvicos y húmicos logran darle una mayor estabilidad a la estructura del suelo desencadenando de este modo una mayor capacidad de infiltración y conductividad hidráulica (Hillel, 1982; Blas y Mejía, 2014).

En la cuenca Pastos el rendimiento hídrico (RH) estuvo condicionado por la magnitud de la evapotranspiración, lo que parece suceder igualmente en otros ambientes de bosque y otros usos del suelo (Zhang *et al.*, 2001; Kitayama y Aiba, 2002; Blas y Mejía, 2014; Frumau *et al.*, 2006). Adicionalmente, los mayores valores densidad aparente que presento esta cuenca en relación con las de restauración causó una disminución en la tasa de infiltración generando que el agua proveniente de la precipitación se perdiera por escorrentía y aumentara el RH (Ilstedt *et al.*, 2007).

Por otro lado, en la cuenca El Silencio el proceso de percolación de agua en el suelo estuvo afectado por evapotranspiración lo que a su vez generó variaciones en la HS y en los caudales en época de bajas precipitaciones (Lara *et al.* 2003). Sin embargo, el incremento de la infiltración debido al proceso de restauración favorece la recarga de los acuíferos y la regulación de los caudales base en esta época (Calder 2005; Bruijnzeel *et al.*, 2007).

6 Conclusión

Los resultados que se presentaron anteriormente demuestran que el proceso de restauración ecológica al que fueron sometidas las cuencas El Silencio y Montañita en comparación con la cuenca Pastos produjo el aumento de la evapotranspiración y la disminución del rendimiento hídrico. De igual manera, generó una mayor variación temporal de la humedad del suelo y la reducción de los caudales base en los periodos de bajas precipitaciones. Así mismo, incrementó el contenido de materia orgánica, mejoró la porosidad y redujo la densidad aparente del suelo. Estas condiciones favorecieron el aumento de la conductividad hidráulica e infiltración, particularmente en Montañita donde se evidenció una reducción considerable en la escorrentía que incide directamente en los caudales pico permitiendo la recarga de los acuíferos y la regulación de los caudales base durante los periodos de bajas precipitaciones, logrando de este modo una mayor provisión de agua para las condiciones edafoclimáticas de la zona de vida de Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB). Adicionalmente, el tiempo del proceso de restauración en las cuencas El Silencio y Montañita es un factor que determina el comportamiento de los procesos ecohidrológicos y el estado de las propiedades hidrofísicas del suelo que controlan dichos procesos.

7 Recomendaciones

- Realizar una adecuada selección de las cuencas hidrográficas para que sus características morfométricas no condicionen la respuesta hidrológica, con el objetivo de evidenciar mayores efectos de la restauración ecológica. Además, asegurarse de conocer el tiempo exacto en que se encuentran las cuencas en restauración para así tener una trazabilidad.
- Inspeccionar las condiciones de los limnógrafos en un periodo menor a 20 días para verificar que los sedimentos transportados por el canal no vayan a alterar su medición. Sin embargo, lo ideal es construir vertederos para tener una mayor precisión en la medición del caudal.
- En una segunda fase es importante monitorear en un periodo mayor a 24 meses y poder realizar más de un muestreo de suelos en las cuencas bajo el proceso de restauración (El Silencio y Montañita), de forma que se puedan evidenciar mayores cambios en las propiedades físicas (Estructura, Densidad aparente y Porosidad) e hidráulicas (infiltración conductividad hidráulica y constantes de humedad) del suelo (Lozano-Baez *et al.*, 2021), pero sobre todo en las variables ecohidrológicas donde se hace necesario que en los puntos de cierre de las cuencas también haya un monitoreo en este periodo de tiempo, debido a que, los cambios en la hidrología se logran notar con series de tiempo más extensas. Adicionalmente, es importante hacer un análisis de isotopos del agua para poder realizar con mayor precisión la separación del flujo base y tener una mayor exactitud. Finalmente, se recomienda incluir en este tipo de estudio una variable ecohidrológica como la interceptación de la precipitación; dado que esto permite que en la determinación del balance hídrico se logre diferenciar el contenido de humedad del suelo y la escorrentía, lo cual afecta el comportamiento de la respuesta de las cuencas ante los eventos de precipitación.
- Para este tipo de estudios es importante realizar el monitoreo de indicadores biológicos del suelo, tales como: la fauna del suelo o comunidades microbianas,

asociados al tipo de cobertura vegetal dado que estos indicadores son los que más rápido se afectan por el cambio del uso del suelo (Lozano-Baez *et al.*, 2021).

8 Bibliografía

Aguilar-Garavito, M., & Ramírez, W. (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá D.C., Colombia.

Aguirre, N., Torres, J., & Velasco-Linares, P. (2013). Guía para la restauración ecológica en los parámos del Antisana, 64.

Aide, T., Zimmerman, J., Pascarella, J. B., Rivera, L. & Marcano-Vega, H. (2000). Forest regeneration in a chronosequence of tropical abandoned pastures: Implications for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 8(4), 328–338. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2000.80048.x>

Alaoui, A., Lipiec, J. & Gerke, H. H. (2011a). A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 115–116, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.002>

Alaoui, A., U. Caduff, H. H. Gerke & R. Weingartner. (2011b). Preferential flow effects on infiltration and runoff in grassland and forest soils. *Vadose Zone J.* 10: 367-377.

Alesander, L. & Skaggs, R.W. (1987). Predicting unsaturated hydraulic conductivity from soil texture. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 113: 184-97.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (2006). Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.

Amézquita E. (1998). Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. En: Romero, G.; Aristizábal, D.; Jaramillo, C. (eds). Encuentro Nacional de labranza de Conservación. Memorias. Villavicencio. Colombia. pp.145-174.

Amézquita, E. (2000), Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. En: Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento. Páginas 11-30. SCCS. Palmira, Colombia

Andréassian, V. (2004). Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1–2), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>

Ángel, L., & Pineda, D. (2019). Medición de la conductividad hidráulica y curvas de retención de humedad en suelos parcialmente saturados utilizando metodologías modernas. Obtenido de Universidad Católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23891/1/TESIS%20GRADO.pdf>

Angulo-Jaramillo, R., Bagarello, V., Iovino, M. & Lassabatere, L. (2016). Saturated soil hydraulic conductivity. Pages 43–180. In: *Infiltration measurements for soil hydraulic characterization*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland

Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado-Barrientos, M. S., Rebel, K., Van Osch, F. P., Rietkerk, M., ... Dawson, T. E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: A review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr005>

Awotwi, A., Kwame Anornu, G.K., Quaye-Ballard, J.A., Annor, T., Forkuo, E.K., Harris, E., Agyekum, J. & Terlabie, J.L. (2019). Water balance responses to land-use/land-cover changes in the Pra River Basin of Ghana, 1986–2025. *CATENA*, 182, 104129.

Azuje, A. E. & Guevara, J. M. (2002). Caracterización de medios porosos utilizando fenómenos de flujo. Obtenido de Universidad Central de Venezuela: <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/69/1/Tesis%20II.pdf>

Baker, D.; Richards, T; Loftus, R., & Kramer, J. (2004). A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, 40(2), 503 – 522.

Barbecho, J. & Calle, J. 2012. Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Río Tarqui. Tesis Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca, Cuenca.

Barrero Rojas, J. P. (2014). Dinámica de la humedad del suelo y el nivel freático, y su influencia sobre el régimen de caudales en la cuenca Los Gavilanes, Veracruz – México. Universidad Nacional de Colombia.

Beck, H. E., Bruijnzeel, L. A., M. Van Dijk, A. I. J., McVicar, T. R., Scatena, F. N. & Schellekens, J. (2013). The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2613–2635. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2613-2013>

Benayas, J. M. R., Newton, A. C., Diaz, A., & Bullock, J. M. (2009). Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. *Science*, 325 (5944) (August), 1121–1124. <https://doi.org/10.1126/science.1172460>

Berli, M. (2001). Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery, 141pp., Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich, Zurich, Suiza.

Beven, K.J. & Germann, P.F. (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18(5): 1311-1325.

Bienes, R., Marques, M. J., Sastre, B., García-Díaz, A., & Ruiz-Colmenero, M. (2016). Eleven years after shrub revegetation in semiarid eroded soils. Influence in soil properties. *Geoderma*, 273, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.023>

Blas, E. & Mejía, AR. (2014). Cobertura vegetal y capacidad de infiltración de agua en el suelo (Tesis de pregrado) UNASAM, Ancash.

Bonilla-Bedoya, S., Estrella-Bastidas, A., Molina, J. R., & Herrera, M. Á. (2018). Socioecological system and potential deforestation in Western Amazon forest landscapes. *Science of the Total Environment*, 644, 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.028>

Bosch, J.M. & Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.* 55, 3–23.

Brady, N.C.(1989). *Natureza e propiedades dos solos*. Livraria Freitas Bastos.

Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 104) (1): 185-228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>

Bruijnzeel, L. A., Burkard, R., Carvajal, A., Frumau, A., Köhler, L., Mulligan, M., ... Tobón, C. (2006). Hydrological impacts of converting tropical montane cloud forest to pasture, with initial reference to northern Costa Rica. Final Technical Report DFID-FRP Project no. R7991.

Buttle, J. M. & McDonald D. J. (2002). Coupled vertical and lateral preferential flow on a forested slopes. *Water Resour. Res.* 38: 18-1-18-16. doi: 10.1029/2001WR000773.

Buytaert, W., Ceñleri, R., De Bièvre, B., Hofstede, R., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean paramos. *Earth Sci. Rev.* 79, 53–72

Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bièvre, B. De. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>

Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19, 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>

Cabrera, M., & Ramírez, W. (2014). Restauración ecológica de los páramos de Colombia: transformación y herramientas para su conservación. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).

Calder, J. (2005). *Blue Revolution, Integrated Land and Water Resources Management*, 2nd edn. Earthscan, London. 379 p. DOI: 10.1002/0470848944.hsa192. https://www.researchgate.net/publication/229453664_Blue_revolution_Integrated_land_and_water_resource_management_second_edition

Cantú, I. & González H. (2005). Pérdidas por interceptación de la lluvia en tres especies de matorral submontano. *Ciencia UANL* 8 (1): 80-85.

Chang, M. (2006). *Forest Hydrology; an Introduction to Water and Forests*. Second Edition. Taylor & Francis. Boca Raton, FL., USA. 474 p.

Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science* (New York, N.Y.), 320(5882), 1458–1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>

Chazdon, R. L. (2014). *Second Growth: The Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation*. Chicago: The University of Chicago. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Chazdon, RL; Brancalion, PHS; Cordero, D.; Laestadius, L.; Calmon, M. & Kumar, C. (2017). Policy-Driven Knowledge Agenda for Global Forest and Landscape Restoration: A policy-driven agenda for restoration. *Conserv. Lett.* 10, 125–132.

Claro, A., Monedero, M., Hernández, S., Somoza, V., & Sánchez, L. (2000). Efecto de la compactación del suelo en la producción de frijol. *Agronomía mesoamericana*, 11(1), 53-57. Obtenido de http://www.mag.go.cr/rev_meso/v11n02_053.pdf

CORNARE. (2018). Plan de manejo del distrito regional de manejo integrado cerros de San Nicolás. El Santuario, Antioquia: Grupo bosques y biodiversidad subdirección general de recursos naturales. 188 p. Recuperado de: <http://www.cornare.gov.co/SIAR/Plan-de-manejo/drmi-cerro-san-nicolas/Plan-de-Manejo-del-Distrito-Regional-de-Manejo-Integrado-Cerros-de-San-Nicolas.pdf>

Costales, E.F. (1979). Infiltration rates of soils as influenced by some land-use types in the Benguet pine watershed. *Sylvatrop Philipp. For. Res. J.* 4, 255–260.

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., De Bièvre, B. Cuenca U. (2010). Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *IAHS-AISH Publication* 336:71–76.

Cruz Romero, B., Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Carrillo González, F., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23(64),26-34. ISSN: 1665-4412. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67441039004>.

CVC, CARDER, CRQ, Consorcio POMCA Quindío, F. A. (2017). Capítulo 7 Morfometría. Actualización POMCA Río La Vieja, 7, 32. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La_Vieja_-_POMCA_en_Ajuste/Fase_Diagnostico/7_Capitulo_Diagnostico_Morfometria.pdf.

DAP. (2016). Anuario estadístico de Antioquia 2016, Capítulo Medio Ambiente: Tema Hidrometeorología, Precipitación promedio anual, por subregiones y municipios. Año 2016. Disponible en: <http://www.antioquiadatos.gov.co/index.php/2-2-4-precipitacion-promedio-anual-por-subregiones-y-municipios-ano-2016>

Dec, D., Dörner, J. y Balocchi, O. (2010). Spatial and temporal changes of soil physical properties of an Andisol in southern Chile as a consequence of grazing and wetting and drying cycles. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Available online: <http://www.iuss.org/19th%20WCSS/symposium/pdf/2235.pdf>

Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69, 1858-1868.

Drewry, J. J., Cameron, K. C. & Buchan, G. D. (2008). Pasture yield and soil physical property response to soil compaction from treading and grazing - A review. *Soil Res.* 46: 237-256

Drewry, J.J., Paton, R.J. & Monaghan, R.M. (2004). Soil compaction and recovery cycle on a Southland dairy farm: implications for soil monitoring. *Australian Journal of Soil Research* 42, 851–856.

Ellies, A, Grez, R. & Ramírez, C. (1997). La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur* 25: 51-56.

Esquivel-arriaga, G., Bueno-hurtado, P., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., & Muñoz-Villalobos, J. A. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del norte-centro de México. *AGROFAZ*, 15(2), 151–161.

Etter, A., Andrade, A., Nelson, C.R., Cortés, J. & Saavedra K. (2020). Assessing restoration priorities for high-risk ecosystems: an application of the IUCN Red List of Ecosystems. *Land Use Policy* 99: 1– 11

Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D. & Possingham, H. (2005). Modeling the age of tropical moist forest fragments in heavily-cleared lowland landscapes of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 208(1–3), 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.12.008>

FAO. (2016). El estado de los bosques del mundo. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma. <http://www.fao.org/3/i5588s/i5588s.pdf>

FAO. (2020). Propiedades Físicas | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved April 16, 2020, from Propiedades físicas website: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.

Farley, K.A. & Kelly, E.F. (2004). Effects of afforestation of a paramo grassland on soil nutrient status. *Forest Ecol. Manage.* 195, 271–290.

Finegan, B. (1993). Procesos dinámicos en bosques naturales tropicales. Curso de bases ecológicas para la producción sostenible. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 25 p.

Flores Ayala, E., Guerra De la Cruz, V., Terrazas González, G., Carrillo Anzures, F., Islas Gutiérrez, F., Acosta Mireles, M. & Buendía Rodríguez, E. (2016). Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 65-76. ISSN: 2007-1132. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=634/63449187006>.

Fournier d'Albe, M. (1985). "The Quantification of Seismic Hazard for the Purposes of Risk Assessment", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, Yugoslavia.

Fundación Natura. (2016). Caracterización, zonificación y monitoreo de carbono y biodiversidad del proyecto agrupado "recuperación de áreas degradadas con sistemas

agroforestales en Colombia - instancia el silencio, bajo los estándares VCS y CCBS". 60 p.

Germer, S., Neill, C., Krusche, A. V. & Elsenbeer, H. (2010). Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: Undisturbed forest to pasture. *Journal of Hydrology*, 380(3–4), 473–480. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.022>

Ghimire, C. P., Bonell, M., Bruijnzeel, L. A., Coles, N. A., & Lubczynski, M. W. (2013). Reforesting severely degraded grassland in the Lesser Himalaya of Nepal: Effects on soil hydraulic conductivity and overland flow production. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(4), 2528–2545. <https://doi.org/10.1002/2013JF002888>.

Ghimire, C. P., Bruijnzeel, L. A., Lubczynski, M. W., & Bonell, M. (2014). Negative trade-off between changes in vegetation water use and infiltration recovery after reforesting degraded pasture land in the Nepalese Lesser Himalaya. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4933–4949. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4933-2014>.

González Cueto, O., Iglesias Coronel, C., Herrera Suárez, M., López Bravo, E. & Sánchez Iznaga, A. (2008). Efecto de la humedad y la presión sobre el suelo en la porosidad total de un Rhodic Ferralsol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(2), 50-54. ISSN: 1010-2760. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93217211>.

Grandy, A.S.; Porter, G.A. & Erich, M.S. (2002). Organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1311 – 1319.

Gribovszki, Z., Szilagyi, J. & Kalicz, P. (2010). Diurnal Fluctuations in Shallow Groundwater Levels and Streamflow Rates and Their Interpretation – A Review. *Journal of Hydrology*. 385. 371-383. [10.1016/j.jhydrol.2010.02.001](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.001).

Guzmán, C., Hoyos-Villada, F., Da Silva, M., Zimale, F., Chirinda, N., Botero, B., Morales, A., Rivera, B., Moreno, P. y Steenhuis, T. (2019). Variability of soil surface characteristics in a mountainous watershed in Valle del Cauca, Colombia: Implications for runoff, erosion, and conservation, *Journal of Hydrology*. 576, 273-286, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.002>.

Gysi, M., Maeder, V. & Weisskopf, P. (2001). Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. *Transactions of ASA*, 44(6): 1385-1389.

Haddad, N. (2004). Introduction - Why Study Earth System Science. Online Internet. Cambridge, TERC. Disponible en: <http://serc.carleton.edu/files/eet/globe/EarthSysInt.pdf>. (Consultado en Julio de 2005)

Hansen, M. C., Potapov, P., & Tyukavina, A. (2019). Comment on “ Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss .” *Science*, 3629(January), 1–5.

Hanson, R. T., Newhouse, M. W., & Dettinger, M. D. (2004). A methodology to assess relations between climatic variability and variations in hydrologic time series in the southwestern United States, 287, 252–269. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.10.006>

Harris, P.J. (1992). Ecología de la población del suelo. En: *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas*. Comp. A. Wild. Madrid : Mundi-Prensa.

Hartge, K.H. & Horn, R. (1999). *Einführung in die Bodenphysik*. Enke, Stuttgart, 304 p.

Hassler, S. K., Zimmermann, B., Breugel, M. Van, Hall, J. S., & Elsenbeer, H. (2011). Forest Ecology and Management Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1634–1642. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.031>

Hernando, C. (2001). *Cuencas hidrográficas: bases conceptuales-caracterización-planificación-administración*. Ibagué: Facultad de Ingeniería Forestal-Universidad del Tolima.

Hillel, D. (1980). *Applications of soil physics*, no. solc. S592.3.H53, Ed. Academic Press, New York, 385 p. ISBN: 978-0-12-348580-9.

Hillel, D. (1982). *Introduction to soil physics*. New York: Academic Press Inc.

Holl, K. D. (2002). Tropical moist forest. In *Handbook of Restoration* (Vol. 2, pp. 539–558).

Holl, K. D. (2013). *Restoring Tropical Forest*. Retrieved from <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/restoring-tropical-forest-97756726>.

Huang, X.D., Shi, Z.H., Fang, N.F., Li, X. (2016). Influences of land use change on baseflow in mountainous watersheds. *Forests* 7, 16. <https://doi.org/10.3390/f7010016>.

IDEAM, IGAC, CORMAGDALENA. (2008). Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia escala 1:100.000, Bogotá.

IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. (p. 69). Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>.

IGAC. (2007). Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia. 328 p

Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., Murdiyarsa, D. (2007). The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 251(1-2): 45-51.

Jaramillo J., D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 613 p.

Jarvis, N. (2007). Near-saturated hydraulic properties of macroporous soils. *Vadose Zone J.* 7: 1302-1310.

Jasmin, B.B. (1976). Grassland uses: effects on surface runoff and sediment yield. *Sylvatrop Philipp. For. Res. J.* 1, 156–164.

Jégou, D., Brunotte, J., Rogasik, H., Capowiez, Y., Diestel, H., Schrader, S. & Cluzeau, D. (2002). Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: Preliminary study. *Eur. J. Soil Biol.* 38: 329-336.

Keenan, R.J., Reams, G.A., Achard, F., de Freitas, J.V., Grainger, A. & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: results from the FAO Global Forest Resources Assessment. *Ecología y ordenación forestal* 352: 9 - 20

Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J., Pachepsky, Y., Van Der Putten, W., Bardgett, R., Moolenaar, S., Mol, G.,

Jansen, B. & Fresco, L. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *The Soil* 2:111–128

Kitayama, K. & Aiba, S.-I. (2002). Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo. *Journal of Ecology*, 90: 37-51. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00634.x>

Krishnaswamy, J., Bonell, M., Venkatesh, B., Purandara, B. K., Rakesh, K. N., Lele, S., ... Badiger, S. (2013). The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis.” *Journal of Hydrology*, 498, 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.034>

Lana-Renault, N. (2008). Respuesta hidrológica y sedimentológica en una cuenca de montaña media afectada por cambios de cubierta vegetal: la cuenca experimental de Arnás, Pirineo Central. Tesis Doctoral inédita, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 314 p.

Lara, M., Rollenbeck, R., Fabian, P. & Bendix, J. (2003). «Relaciones entre precipitación y vegetación en el bosque tropical de montaña». 2da conferencia. Ecología de bosques tropicales. Loja, Ecuador.

Laurance, W. F. (2007). Environmental Science: Forests and floods. *Nature* 449: 409-410.

Li, Y.X., Tullberg, J.N., Freebairn, D.M., & Li, H.W. (2009). Functional relationships between soil water infiltration and wheeling and rainfall energy. *Soil & Tillage Research*. Vol. 104. pp. 156-163.

Lozano-baez, S. E., Cooper, M., Ferraz, S. F. B., Rodrigues, R. R., Pirastru, M., & Di Prima, S. (2018). Previous Land Use Affects the Recovery of Soil Hydraulic Properties after Forest Restoration. *Water*, 10, 1–16. <https://doi.org/10.3390/w10040453>

Lozano-baez, S. E., Domínguez-Haydar, Y., Meli, P., Meerveld, I. Van, Vásquez-Vásquez, K., & Castellini, M. (2021). Key gaps in soil monitoring during forest restoration in Colombia. *Restoration Ecology*, 29(4), 1–7. <https://doi.org/10.1111/rec.13391>

Machlis, G. (1993). Áreas protegidas en un mundo cambiante: Los aspectos científicos. En Parques y progreso. UICN, BID. IV Congreso mundial de parques y áreas protegidas, Caracas, Venezuela. 37-53 p.

Malmer, A. (1996). Hydrological effects and nutrient losses of forest plantation establishment on tropical rainforest land in Sabah. *Malaysia Journal of Hydrology* 174, 129–148

Mapa, RB. (1995). Effect of reforestation using *Tectona grandis* on infiltration and soil water retention. *Forest Ecology and Management*. 77(1-3):119-125.

Martínez H., E., Fuentes E., J. P., & Acevedo H., E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>

Martínez-Mena, M., López, J., Almagro, M., Boix-Fayos, V., & Albaladejo, J. (2008). Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of south-east Spain. *Soil and Tillage Research*, 99, 119-129.

McDaniel, P. A., Lowe, D. J., Arnalds, O. & Ping, C-L. (2012). Andisols. In: Huang, P. M.; Li, Y.; & Sumner, M. E. (editors), *Handbook of Soil Sciences*. Second Edition. Vol. 1: Properties and Processes. CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL, pp. 33.29-33.48.

Mendes, MS., Latawiec, AE., Sansevero, JB., Crouzeilles, R., Moraes, LFD. & Castro, A. (2019). Look down – there is a gap – the need to include soil data in Atlantic Forest restoration. *Restoration Ecology* 27: 361– 370

Meunier, M. (1996). La cubierta forestal y las crecidas en las pequeñas cuencas de montaña. *Unasylva*. 185. Vol 47. pp 29-37

Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible de Colombia. (Minambiente). (2020). En el Día del Árbol, Minambiente invita a sembrar árboles para respirar mejor. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/5065-en-el-dia-del-arbol-minambiente-invita-a-sembrar-arboles-para-respirar-mejor>

Molina, A., Vanacker, V., Balthazar, V., Mora, D., & Govers, G. (2012). Complex land cover change, water, and sediment yield in a degraded andean environment. *Journal of Hydrology*, 472–473, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.012>

Morikawa-Sakura, M.S. & Yoshitaka, K. (2014). El vínculo de la conductividad hidráulica saturada con la velocidad de infiltración sub-superficial del suelo del bosque. *Revista de investigación de la Universidad Norbert Wiener*, 3(41), 1- 12.

Muhammad, A. & Rattan L. (2009). Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research*. Vol. 103. pp. 364-372.

Murcia, C. & Guariguata, MR. (2014). La restauración ecológica en Colombia: Tendencias, necesidades y oportunidades. *Documentos Ocasionales 107*. Bogor, Indonesia: CIFOR.

Murcia, C., Guariguata, M. R., Andrade, Á., Andrade, G. I., Aronson, J., Escobar, E. M., ... Montes, E. (2016). Challenges and Prospects for Scaling-up Ecological Restoration to Meet International Commitments: Colombia as a Case Study. *Conservation Letters*, 9(3), 213–220. <https://doi.org/10.1111/conl.12199>

Nanzyo, M. (2002). Unique properties of ash volcanic soils. *Global Environmental Research* 6 (2): 99- 112.

Nathan, R. J.; & Macmahon, T. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26 (7), 1465 – 1473.

Neary, D.G., Ice, G.G. & Jackson, C.R. (2009). Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management*, 258(10): 2269-2281.

Nerhot, P. R., Monzón, D. R., Alvarez, J. R., & Rojas, A. E. (2018). Niveles de materia orgánica en distintos tipos de manejos / Levels of organic matter in different types of management. *Brazilian Journal of Development*, 4(7 Especial). pp. 3789-3800. Disponible en: <http://brjd.com.br/index.php/BRJD/article/view/404/345>.

Ochoa-tocachi, B. F., Buytaert, W., Bièvre, B. De, & Céleri, R. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30, 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>

Ohta, S. (1990). Influence of deforestation on the soils of the Pantabangan area, Central Luzon, the Philippines. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 561–573.

Ospina, A. (2003). *Agroforestería: aportes conceptuales, metodológicos y prácticos para el estudio agroforestal*. Cali, Colombia: Acasoc. 205 p.

Osuna-Ceja E. S., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, Ma. de L., Martínez-Menes, M. R. & González-Cossío, F. V. (2006). Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40:27-38.

Pereira, N. A., Di Prima, S., Bovi, R. C., da Silva, L. F. S., de Godoy, G., Naves, R. P., & Cooper, M. (2020). Does the Process of Passive Forest Restoration Affect the Hydrophysical Attributes of the Soil Superficial Horizon? *Water*, 12(6), 1689. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w12061689>

Pérez, L., & García, G. (2015). Evaluación de la conductividad hidráulica del suelo en un sistema agroforestal de café (*coffea arabica*) en CENECOOP, Masaya, Nicaragua, 2014. Obtenido de Universidad Nacional Agraria: <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnp33p438e.pdf>

Perkins, K. S., Nimmo, J. R., Medeiros, A. C., Szutu, D. J., & von Allmen, E. (2014). Assessing effects of native forest restoration on soil moisture dynamics and potential aquifer recharge, Auwahi, Maui. *Ecohydrology*, 7(5), 1437–1451. <https://doi.org/10.1002/eco.1469>

Pizarro T., R., Ramírez B., C., & Flores V., J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque (Valdivia)*, 24(3), 31–38. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002003000300003>

Price, K. (2011). Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Progress in Physical Geography*, 35(4), 465–492. <https://doi.org/10.1177/0309133311402714>

Raghunath, H. M. (2006). *Hydrology: Principles, Analysis, Design* (2nd revise). New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers.

Regüés, D. & Nadal-Romero, E. (2012). Incertidumbre en la evaluación del transporte de sedimento en suspensión en cárcavas del Pirineo Central. En: *Avances de la Geomorfología en España. 2010-2012. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*. Santander, 17-20 septiembre de 2012. Coordinador: González Díez. pp. 563-566.

Reichardt, K. (1985). *Processos de transferência no sistema soloplanta- atmosfera*. 4 ed. Piracicaba. Fundação Cargill. 445p.

Reiners, W. A., Bouwman, A. F., Parsons, W. F. J., & Keller, M. (1994). Tropical Rain Forest Conversion to Pasture : Changes in Vegetation and Soil Properties. *Ecological Application*, 4(2), 363–377.

Restrepo, Z., Aristizábal, C., Uribe, L. & Tobón, M. (2016). Estimación de la pérdida de biomasa y carbono por deforestación y degradación en los bosques del Valle de San Nicolás. En Quijano, M. (Ed.). *Flora del Oriente antioqueño: Biodiversidad, ecología y estrategias de conservación*. 266 p. Bogotá, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Robinson, M., Cognard-Plancq, A. L., Cosandey, C., David, J., Durand, P., Führer, H. W., ... Zollner, A. (2003). Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: A European perspective. *Forest Ecology and Management*, 186(1–3), 85–97. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00238-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00238-X)

Rodríguez, C., Herrera, O., & Madero, E. (2000). efecto de la labranza en las propiedades físicas de un Vertisol Ustico y en la producción de sorgo, en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta agronómica*, 50(1).

Rodríguez-Vásquez, A. F., Aristizábal-Castillo, A. M. y Camacho-Tamayo, J. H. (2008). Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo andico., *Engenharia Agrícola*, Vol. 28, No. 1, pp. 64-75.

Ruiz-Camacho, N., E. Velásquez, A. Pando, T. Decaens, et F. Dubs. (2009). Indicateurs synthétiques de la qualité du sol. *Etu. Gest. Sols* 16: 323-338.

Sánchez N, D., Pinilla, G. & Mancera P, J. (2015). Efectos del uso del suelo en las propiedades edáficas y la escorrentía superficial, en una cuenca de la Orinoquia colombiana. *Colombia Forestal*, 18(2),255-272.

Saunders, L. C. V., Libardi, P.L., y Reichardt, K. (1978). Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. *R. Bras. Ci. Solo, Campinas*, 2: 164-7.

Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Stonestrom, D. A., Prudic, D. E., & Dennehy, K. F. (2005). Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology*, 11(10), 1577-1593.

Schnitzer. M. (1991). Soil organic matter - the next 75 years. *Soil Science*. 151: 41-58.

Seong, J.C. & Choi, J. (2007). GEODIST: A C++ program for calculating geodesic distances with a shapefile. *Computers & Geosciences*, 33: 705-708.

Serrano-Muela, M. P. (2012). Influencia de la cubierta vegetal y las propiedades del suelo en la respuesta hidrológica: generación de escorrentía en una cuenca forestal de la montaña media pirenaica. Universidad de Zaragoza.

Shapiro, S.S., & Wilk, M.B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3,4), 591–611. <http://dx.doi.org/10.2307/2333709>.

Singleton, P.L. & Addison, B. (1999). Effects of cattle treading on physical properties of three soils used for dairy farming in the Waikato, North Island, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research* 37, 891–902.

Smettem, K. (2009). The relation between runoff generation and temporal stability of soil macropores in a fine sandy loam. *Biologia* 64: 470-473.

Snelder, D.J. (2001a). Soil properties of Imperata grasslands and prospects for tree-based

Snelder, D.J. (2001b). Forest patches in Imperata grassland and prospects for their preservation under agricultural intensification in Northeast Luzon, the Philippines. *Agrofor. Syst.* 52, 207–217.

Stolte, J. (2003). Effects of land use and infiltration behaviour on soil conservation strategies.

Suding, K.; Higgs, E.; Palmer, M.; Callicott, JB.; Anderson, CB.; Baker, M.; Gutrich, JJ; Hondula, KL.; LaFevor, MC. & Larson, BM. (2015). Committing to ecological restoration. *Science*, 348, 638–640.

Suganuma, M. S. & Durigan, G. (2015). Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. *Restoration Ecology*, 23(3), 238–251. <https://doi.org/10.1111/rec.12168>

Tobón Marin, C. (1999). Monitoring and modelling hydrological fluxes in support of nutrient cycling studies in Amazonian rain forest ecosystems.

Tobón, C., Bruijnzeel, L. A., Frumau, K. F. A., & Calvo-Alvarado, J. C. (2010). Changes in soil physical properties after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. In *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management* (pp. 502–515). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384.054>

Torres, C., Fuentes-Ponce, M., Herrera, B. G., & De León, F. (2013). Influencia De Las Raíces Sobre La Agregación Del Suelo. *Terra Latinoamericana*, 31, 71–84. <https://doi.org/10.2475/ajs.237.6.389>

Trimble, S.W. & Mendel, A.C. (1995). The cow as a geomorphic agent - a critical review. *Geomorph* 13: 233-253.

Van Der Salm, C., Denier Van Der Gon, H., Wieggers, R., Bleeker, A., & Van Den Toorn, A. (2006). The effect of afforestation on water recharge and nitrogen leaching in The Netherlands. *Forest Ecology and Management*, 221(1–3), 170–182. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.09.027>

Vanclay, J.K. (2009). Gestión del uso del agua de las plantaciones forestales. *Manejo y ecología forestal* 257 (2): 385–389.

Vargas, O. (2007). Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. (Grupo de Restauración Ecológica, Ed.) (1 edición). Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from [http://www.ciencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/user_46/file/Guia Metodologica.pdf](http://www.ciencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/user_46/file/Guia%20Metodologica.pdf)

Vásquez Velázquez, G. (2016). Influencia del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de cuencas de cabecera en los andes centrales de Colombia (tesis de doctorado). Universidad Nacional de Colombia.

Vervoort, R.W. & Cattle, S.R. (2003). Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters top ore space geometry and pore-size distribution. *Journal of Hydrology*, 272: 36-49.

Vidal, I.; Fernández, B. y Duarte, N. (1981). Influencia de cuatro métodos de labranza sobre la velocidad de infiltración y estabilidad de los agregados del suelo. *Agricultura Técnica* 41(2):83-88.

Volveras-Mambuscay, B., Amézquita-Collazos, E. & Campo-Quesada, J. M. (2016). Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 372.

Vörösmarty, C., Lettenmaier, D., Leveque, C., Meybeck, M., Pahl-Wostl, C., Alcamo, J., Cosgrove, H., Grassl, H., Hoff, H., & Kabat P. (2004). Humans transforming the global water system. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85, 509-520.

Wahren, A., Feger, KH., Schwarzel, K. & Münch, A. (2009). Land-use effects on flood generation-considering soil hydraulic conductivity measurements in modeling. *Adv. Geosci.*, 21, 99-107.

Wang-Erlandsson, L., Fetzer, I., Keys, P. W., van Der Ent, R. J., Savenije, H. H., and Gordon, L. J. (2018). Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 22, 4311–4328. doi: 10.5194/hess-22-4311-2018.

Wei, W., Chen, L., Fu, B., Huang, Z., Wu, D., & Gui, L. (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology*, 335, 247-258.

Wei, X. & Zhang, M. (2010). Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single watershed study. *Water Resources Research*, 46(12), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2010WR009250>

Whalley, W. R., B. Riseley, P. B. Leeds-Harrison, N. R. A. Bird, P. K. Leech & W. P. Adderley. (2005). Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *Eur. J. Soil Sci.* 56: 353-360.

Wigmosta, M. & Prasad, R. (2005). Upscaling and downscaling - dynamic models. In *Encyclopedia of hydrological sciences*, Anderson MG, McDonnell JJ (eds). John Wiley & Sons: Chichester, Reino Unido; 165-176

Yi, X.S., Li, G.S. & Yin, Y.Y. (2012). The impacts of grassland vegetation degradation on soil hydrological and ecological effects in the source region of the Yellow River--A case study in Junmuchang region of Maqin country. *Procedia Environmental Sciences*. 13. 967–981. [10.1016/j.proenv.2012.01.090](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.090).

Zhang, B., Yang, Y. S., & Zepp, H. (2004). Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China. *Catena*, 57(1), 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.07.001>

Zhang, J., Bruijnzeel, L.A., Quiñones, C., Tripoli, R., Asio, V. & van Meerveld, H.J. (2019). Soil physical characteristics of a degraded tropical grassland and a 'reforest': Implications for runoff generation, *Geoderma*. 333, P. 163-177, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.022>.

Zhang, L., Dawes, WR., & Walker, GR. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37:701-708.

Zhang, S., Yang, H., Yang, D., & Jayawardena, A.W. (2016). Quantifying the effect of vegetation change on the regional water balance within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters*, 43, 1140– 1148. <https://doi.org/10.1002/2015GL066952>

Zhao, F., Zhang, L., Xu, Z. & Scott, D. (2010). Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate change on streamflow. *Water Resources Research - WATER RESOUR RES.* 46. 10.1029/2009WR007702.

Ziegler, A.D., Giambelluca, T.W., Tran, L.T., Vana, T.T., Nullet, M.A., Fox, J., Vien, T.D., Pinthong, J., Maxwell, J.F. & Evett, S. (2004). Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountainous northern Vietnam: evidence of accelerated overland flow generation. *Journal of Hydrology* 287, 124–146

Zimmermann, B., Elsenbeer, H., & Moraes, J. M. De. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties : Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management*, 222, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070>

Zotarelli, L., Dukes, M. D. & Morgan, K. T. (2013). Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. *Edis*, 2013(2), 1–4. <https://doi.org/10.32473/edis-ae496-2013>

Zwartendijk, B.W., van Meerveld, H.J., Ghimire, C.P., Bruijnzeel, L.A., Ravelona, M., Jones, J.P.G. (2017). Rebuilding soil hydrological functioning after swidden agriculture in eastern Madagascar. *Agric. Ecosyst. Environ.* 239, 101–111.